

Е. Д. КИМ (НИИВН)

Научно-исследовательский институт высоких напряжений, ул. Генерала Батюка, 22, г. Славянск, Донецкая обл., Украина, 84121, эл. почта: ykim@meta.ua

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗАКАЛКИ СТЕКЛОДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Введение

История применения изоляторов из закаленного стекла уходит в далекие 50-ые годы прошлого столетия. Благодаря их уникальным качествам «само идентифицировать» в случае повреждения диэлектрика, но при этом сохранять механическую прочность конструкции стеклянные изоляторы наиболее массово эксплуатируются в воздушных сетях высокого напряжения. Несмотря на то, что последние годы отмечается широкое использование полимерных изоляторов в строительстве воздушных сетей, но все же на ВЛ 330 кВ и выше изолирующим элементом остаются стеклянные изоляторы. Спрос на стеклянные изоляторы не снижается, создаются новые производители данной продукции. В связи с этим острота конкурентной борьбы между компаниями – изготовителями сохраняется, что вынуждает искать пути снижения удельных затрат и повышения технических характеристик изделий. Разрабатываются новые более технологичные составы стекол, приемы закалки, сборки изоляторов, методы контроля и т.д.

В настоящей работе рассматривается одна из задач контроля качества закалки стеклодеталей в условиях массового производства. Дело в том, что стеклянный элемент несет на себе наибольшую нагрузку: это комплекс механических и электрических напряжений в сочетании с климатическими воздействиями, поэтому надежность и долговечность работы изоляции ВЛ практически определяется состоянием стекла в конструкции изолятора. Вместе с тем нужно констатировать, что методы, приемлемые для количественной характеристики устойчивости элементов из стекла пока что в открытой публикации не предложены. Регламентировано в ГОСТ [1] качество стеклодетали оценивать визуально по внешнему виду поверхностного слоя стекла, по наличию различного рода дефектов. По-видимому, задачи более объективного выходного контроля качества изоляционной детали решаются в каждом производстве обособленно, основываясь на своем опыте и располагаемой информации.

В последнее время создаются малые предприятия по сборке изоляторов на купленных извне составных элементах, в том числе, стеклодеталей. Для таких предприятий также остается открытым вопрос количественного определения качества приобретаемых изделий на основе общепринятых методов и критериев приемки.

Методы точечного измерения закалочных напряжений

Сущность закалки стеклоизделия заключается:

- в нагреве до температуры, при которой оно переходит в пластическое состояние, но при этом не изменяет своей первоначальной формы и размеров;

- в резком охлаждении воздушным потоком в течение нескольких минут.

В результате такой термической обработки изделия создаются (рис. 1):

- напряжения растяжения во внутренних слоях (+);

- напряжения сжатия в наружных слоях (-).

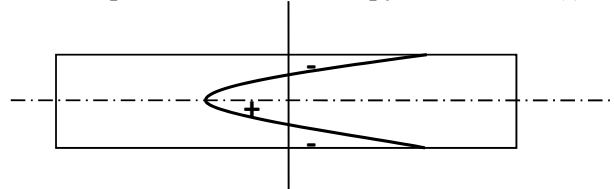


Рис. 1. Распределение закалочного напряжения в стекле

При изгибе напряжение сжатия в поверхностном слое «компенсирует» воздействующее напряжение растяжения. Кроме того предельное напряжение стекла на сжатие на порядок превышает предельную прочность при растяжении. Эти два обстоятельства обуславливают упрочнение закаленного стеклоизделия в несколько крат.

Суть метода измерения закалочного или остаточного напряжения в твердом теле состоит в фиксации упругого перемещения в исследуемой локальной области, обусловленного наличием остаточного сжимающего напряжения. Применяются два способа реализации

непосредственного измерения. Первый - создается несквозное отверстие на интересующей поверхности и измеряется деформация в окрестности отверстия, в простейшем случае, с помощью тензодатчиков [2]. Второй – сопоставлением микрорельефов (голограмм) окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии и после высверливания или травления малой лунки [3]. Для этой цели используются лазерная и компьютерная технология. В результате наложения голограмм или цифровой фотографии при их одновременном восстановлении упругие перемещения поверхности в окрестности лунки выявляются в виде интерферограммы или спекл-интерферограмм, которые расшифровываются по разработанной схеме. Методы, основанные на точечном механическом воздействии исследуемой поверхности, являются универсальными, что позволяет установить искомые напряжения в данной локальной области в абсолютных единицах измерения. Вместе с тем нетрудно убедиться, что они малопригодны, когда дело касается массового производства.

Метод измерения двойного лучепреломления

Стекло с остаточными напряжениями обладает свойством двойного лучепреломления, что может быть обнаружено с помощью полярископов [4]. Линейно поляризованный луч, проходящий через стекло с остаточными напряжениями, распадается на два луча (рис. 2): обыкновенный *o* и необыкновенный *e* с собственными показателями преломления: n_o и n_n .

Оба луча в стекле распространяются с различной скоростью, приобретая некоторую разность хода. Величина двойного лучепреломления определяется разностью между показателями преломления Δn обыкновенного и необыкновенного лучей или разностью хода Δ , выраженной в нанометрах и отнесенной к толщине образца стекла в 1 см:

$$\Delta n = n_o - n_e = \frac{\Delta}{l}$$

Таким образом, двойное лучепреломление характеризует степень однородности стекла по показателю преломления. При известной величине разности хода лучей определяется по табличным данным средневзвешенное напряжение в рассматриваемом участке стекла. Метод оценки напряжения в стекле, основанный на измерении разности хода лучей детально описан в ГОСТ 3591 -91 [5]. Как показывает практика,

данный метод эффективен для контроля изделий с плоско - параллельными поверхностями. В случае с криволинейными поверхностями, как правило, ограничиваются упрощенными критериями оценки степени термообработки стекла по цветным картинам интерференционных полос на экране анализатора полярископа.

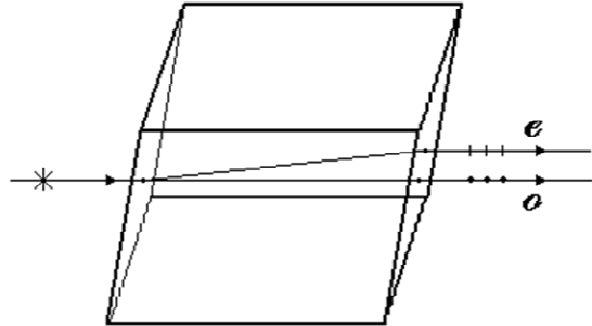


Рис. 2. Двойное лучепреломление

Ударная прочность как параметр контроля качества стеклодеталей

Идея заключается в установлении статистической корреляции между ударной прочностью стеклодеталей и прочностью на растяжение самих изоляторов, изготовленных с использованием деталей данной совокупности – партии. Под ударной прочностью понимается устойчивость стеклодеталей к внешнему динамическому воздействию. Ударная прочность стеклодеталей определяется следующим образом. Испытуемая деталь устанавливается горизонтально головкой вниз, при этом только тарелка ложится на жесткую поверхность, как показано на рис. 3.

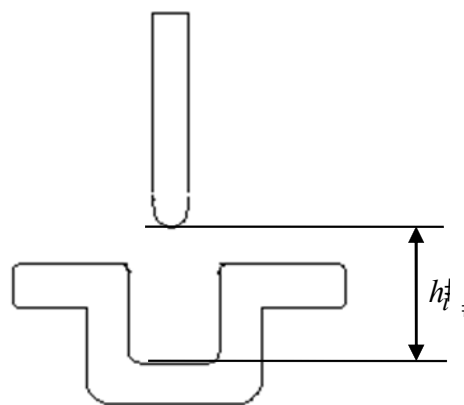


Рис. 3. Схема испытания на ударную прочность детали

Боек представляет собой металлический цилиндр с массой $m_б$ со сферическим наконечником и может падать практически свободно с фиксированной высоты на поверхности головки стеклодетали. Тогда параметром, характери-

зуючим устійчивость i – того изделия принимается минимальная высота бойка h_i , при которой оно разрушается. Основное требование к установке, на котором проводятся испытания – это отсутствие видимой деформации в момент соударения бойка со стеклом.

Из накопленного опыта установлено, что:

- критическая высота, при которой разрушается испытуемый объект, не зависит от предшествующих ударных воздействий;
- статистика параметра h_i одной совокупности изделия хорошо согласуется с нормальным законом распределения случайных величин.

Как известно, характер разрушения изоляторов при испытании на растяжение неоднороден: кроме разрушения стеклодеталей имеет место отрыв стержня или шапки; в редких случаях, сползание стержня или шапки. Для корректности решения рассматриваемой задачи необходимо испытывать стеклодетали в конструкции изолятора с упрочненной арматурой, что исключает разрушение металлических элементов. В этом случае можно показать, что распределение разрушающей силы p_i изолятора хорошо аппроксимируются нормальным законом.

Нормирование ударной прочности стеклодеталей

Пусть мы располагаем результатами испытаний на ударную прочность стеклодеталей $h_i (i = 1, 2..n)$, случайно отобранных из одной генеральной совокупности – партии, и на механическую прочность соответствующих изоляторов $p_j (j = 1, 2..m)$, собранных из этих деталей с упрочненной арматурой.

Требуется установить предельную границу ударной прочности стеклодеталей h_H , соответствующих номинальной прочности изоляторов $p_j > P_H$.

Воспользуемся известными математическими приемами при оценке статистических характеристик случайных величин, распределенных по нормальному закону. Для некоторой случайной величины a_i в качестве оценки результатов опыта приняты среднееарифметическое значение \bar{a} и среднеквадратическое отклонение S_a при n измерений – выборки:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}; \quad (1)$$

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum (\bar{a} - a_i)^2}{n-1}}. \quad (2)$$

При $n \rightarrow \infty$ среднееарифметическое значение (1) стремится к своему математическому ожиданию $\bar{a} \rightarrow \mu_a$; среднеквадратическое отклонение (2) к стандарту отклонения: $S_a \rightarrow \sigma_a$. Предельные характеристики случайных величин с заданной доверительной вероятностью F_D можно оценить по следующим соотношениям:

$$\mu_a = \bar{a} \mp \frac{S_a}{\sqrt{n}} \cdot t_a; \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{n-1} \cdot S_a}{\chi_{2a}^2} < \sigma_a < \frac{\sqrt{n-1} \cdot S_a}{\chi_{1a}^2}, \quad (4)$$

где $t_a, \chi_{1a}^2, \chi_{2a}^2$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона [6].

Принимаем рабочую гипотезу о том, что функции распределения случайных величин: ударной прочности стеклодеталей F_{cm} и механической прочности изоляторов F_{uz} , собранных из этих стеклодеталей эквивалентны между собою, т.е.

$$F_{cm}(h_i) \cong F_{uz}(p_j). \quad (5)$$

Тогда можно принять, что относительные объемы изделий, не соответствующих нормированным значениям, также примерно равны друг с другом

$$F_{cm}(0 < h_i \leq h_H) \cong F_{uz}(0 < p_j \leq P_H). \quad (6)$$

Для вычисления вероятностей нахождения случайных величин в заданных интервалах (6) воспользуемся функцией Лапласа

$$\Phi\left(\frac{h_H - \mu_h}{\sigma_h}\right) \cong \Phi\left(\frac{P_H - \mu_p}{\sigma_p}\right), \quad (7)$$

где аргументы функций определяются с помощью вышеприведенных формул (1) - (4).

Тогда из (7) получаем выражение для нижней границы ударной прочности стеклодеталей с надежностью F_D ,

$$h_H \geq \bar{\mu}_h + \bar{\sigma}_h \frac{P_H - \mu_{мин.п}}{\sigma_{мак.п}}. \quad (8)$$

Здесь для искомой ударной прочности принимаем средние значения математического ожидания (3) и стандарта отклонения (4)

$$\bar{\mu}_h = \bar{h}; \quad \bar{\sigma}_h = \frac{\sqrt{n-1} \cdot S_a}{2} \left(\frac{1}{\chi_{2a}^2} + \frac{1}{\chi_{1a}^2} \right),$$

а для прочности изоляторов - наиболее пессимистическое сочетание: минимальное значение математического ожидания (3) и максимальный стандарт отклонения (4). Таким образом, получаемая согласно (8) величина h_n устанавливает нижний порог ударной прочности стеклодеталей.

Пример расчета

Выполним статистический анализ данных испытаний двух разных совокупностей - партий А и Б стеклодеталей ($m_6 = 1290$ гр – масса бойка) и соответствующих изоляторов класса $P_n = 120$ кН одного из производителей стеклянных изоляторов (табл. 1 - 4).

Определяем числовые характеристики по результатам испытаний партии А.

Для стеклодеталей имеем:

$n = 31$ – количество выборок;

$t_h = 2,048, \chi_{1h}^2 = 44,46, \chi_{2h}^2 = 15,3$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответ-

ственно, для $n = 31$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\bar{\mu}_h = 532$ мм — среднее математическое ожидание (среднеарифметическая величина) прочности стеклодеталей;

$\bar{\sigma}_h = 32,1$ мм – средний стандарт отклонение выборки;

Для изоляторов имеем:

$m = 32$ – количество выборок;

$t_p = 2,04, \chi_{1p}^2 = 17,54$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответственно, для $m = 32$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\mu_{\text{мин.р}} = 131$ кН – минимальное математическое ожидание прочности изолятора;

$\sigma_{\text{макс.р}} = 2,25$ кН – максимальный стандарт отклонения.

Подставляем эти значения в (8), получаем нижнюю граничную ударную прочность стеклодеталей, обеспечивающих нормированную прочность изоляторов

$$h_n \geq 532 + 32,1 \frac{120 - 131}{2,25} = 375 \text{ мм.}$$

Аналогичную расчетную процедуру выполним для продукции партии Б, результаты испытаний которых приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 1

Результаты испытания стеклодеталей на ударную прочность, h_i , мм (партия А)

450	475	500	350	750	725	575	625	525	500	825	700	600	400	375
300	400	575	425	425	750	500	425	725	525	475	500	625	600	

Таблица 2

Результаты испытания изоляторов на растяжение, p_j , кН (партия А)

133	126	139	127	134	131	128	143	134	140	146	145	116	136	131	130
125	133	137	132	147	136	133	131	135	134	130	128	149	141	136	127

Таблица 3

Результаты испытания стеклодеталей на ударную прочность, h_i мм (партия Б)

325	350	325	325	425	525	350	400	350	400	325	350	400	350	425	525
350	400	425	400	400	450	700	400	350	600	350	350	300	300	350	400
350	350	350	350	300	300	600	500	400	350	450	500	500	400	800	400
450	400	300	450	400	450	350									

Таблица 4

Результаты испытания изоляторов на растяжение, p_j , кН (партия Б)

140	88	100	113	100	129	139	89	121	135	105	121	128	136	118	136
118	126	112	105	122	116	130	103	121	131	118	110	80	120	96	128
136	115	129	145	112	102	128	101	131	137						

Статистические параметры для стеклодеталей:

$n = 51$ – количество выборок;

$t_h = 2,0$; $\chi_{1h}^2 = 71,42$; $\chi_{2h}^2 = 32,36$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответственно, для $n = 55$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\bar{\mu}_h = 401$ мм – среднее математическое ожидание прочности стеклодеталей (среднеарифметическая величина);

$\bar{\sigma}_h = 17,9$ мм – средний стандарт отклонение выборки.

Для изоляторов имеем:

$m = 42$ – количество выборок;

$t_p = 2,02$; $\chi_{1p}^2 = 25,21$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответственно, для $m = 42$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\mu_{\text{мин.р}} = 113$ кН – минимальное математическое ожидание прочности изолятора;

$\sigma_{\text{макс.р}} = 3,96$ кН – максимальный стандарт отклонения.

Подставляем в соотношение (8), получаем

$$h_H \geq 401 + 17,9 \frac{120 - 113}{3,96} = 433 \text{ мм.}$$

Сравнивая результаты испытаний изоляторов двух партии (см. табл. 2 и 4) можно отметить,

что они существенно отличаются между собой. Изоляторы партии А характеризовались высокой прочностью, $p_j > P_H = 120$ кН, когда как для партии Б из 51 шт. испытанных изоляторов 20 шт. разрушились при нагрузке ниже нормированной величины. Несмотря на значительную разницу в качествах изделий двух партий предложенная методика приводит к достаточно близким для практики нормированным значениям ударной прочности стеклодеталей.

Выводы

Приведен алгоритм определения нормированного значения h_H ударной прочности для оценки качества закалки стеклодеталей в условиях массового производства.

2. Существование непосредственной корреляции между ударной прочностью стеклодеталей и механической прочностью изоляторов показано на примерах статистического анализа данных испытаний двух партий изоляторов одного и того же типа, но с существенно отличающимися прочными характеристиками.

3. Рекомендуется нормировать ударную прочность стеклодеталей и ввести метод испытания в соответствующий стандарт по техническим требованиям составных элементов изолятора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 18328-73. Изоляторы стеклянные линейные подвесные и штыревые. Требования к качеству стекла и поверхности изоляционных деталей.
2. Чернышев Г. Н. Остаточные напряжения в деформированных твердых телах / Г.Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев, И. И. Пономарев. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.
3. Гусев М. Е. Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений / М. Е. Гусев, А. А. Воронин, В. С. Гуревич, А. М. Исаев, И. В. Алексеенко, В. И. Редкоречев. – Наносистемы: Физика Химия Математика. – 2011. – № 2. – С. 23-39.
4. Измерение двойного лучепреломления оптических стекол [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v20493/>
5. ГОСТ 3519-91 Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления
6. Чернова Н. И. Математическая статистика: Учеб. пособие / Н. И. Чернова. – Новосибирск.: Новосибир. гос. ун-т., 2007. – 148 с.

Поступила в печать 20.08.2014.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

REFERENCES

1. GOST 18328-73. *Izolyatory steklyannye lineinye podvesnye i shtyrevye*. [Glass linear suspension and insulators. The requirements to the quality of glass surface and insulating parts].
2. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., I.I. Ponomarev *Ostatochnye napryazheniya v deformirovannykh tverdykh telakh* [Residual stresses in deformed solid telah], M.: Nauka. Fizmatlit, 1996.-240 p.
3. Gusev M.E., Voronin A.A., Gurevich V.S., Isaev A.M., Alekseenko I.V., Redkorechey V.I. *Metody tsifrovoy golograficheskoi interferometrii i ikh primeneniye dlya izmereniya nanoperemeshchenii* [Digital holographic interferometry methods and their application for measuring nanodisplacement], Nanosystems: Physics Chemistry Matematika, 2011, no. 2, pp. 23-39.
4. Measurement of birefringence of optical glasses. Available at: <http://bib.convdocs.org/v20493/>
5. GOST 3519-91. *Materialy opticheskie. Metody opredeleniya dvulucheprelomeniya* [Optical Materials. Methods for determination of birefringence].
6. Chernova N. I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical Statistics], Novosibirsk, Novosib. state. Univ., 2007, 148 p.

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

© Ким Е. Д., 2014

Стекланні ізолятори, завдяки унікальним властивостям «само ідентифікувати» в разі пошкодження діелектрика, але при цьому зберігати механічну міцність конструкції, отримали найбільш масове застосування в повітряних мережах високої напруги. Висока експлуатаційна надійність у поєднанні з ефектом самоконтролю обумовлюється закаливанням скляних деталей в процесі її виготовлення. Разом з тим контроль якості склодеталей обмежується візуальним оглядом поверхневого шару скла на предмет наявності різного роду дефектів. Існуючі методи визначення залишкової напруги в локальних крапках або оптичні методи малоефективні в умовах поточного виробництва.

Пропонується кількісна методика оцінки якості закаливання склодеталей, заснована на статистичному аналізі прочностних характеристик деталей і кінцевої продукції - ізоляторів. Показано, що між стійкістю склодеталей до ударних дій і механічною міцністю ізоляторів існує статистична кореляція, яка може бути виражена на основі нормального закону розподілу випадкових величин. Рекомендується нормувати ударну міцність склодеталей і ввести з методом випробування у відповідний стандарт по технічних вимогах складових елементів ізолятора.

Ключові слова: скляний ізолятор, склодеталь, закалка, методи вимірювання залишкової напруги, ударна міцність, міцність на розтягнення, статистична кореляція, нормальний розподіл.

UDC 631.331.3

Є. Д. КИМ (НДІВН)

Науково-дослідний інститут високих напруг, вул. Генерала Батюка, 22, м. Слов'янськ, Донецька обл., Україна, 84121, ел. пошта: ykim@meta.ua

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЗАКАЛЮВАННЯ СКЛОДЕТАЛЕЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Скляні ізолятори, завдяки унікальним властивостям «само ідентифікувати» у разі пошкодження діелектрика, але при цьому зберігати механічну міцність конструкції, отримали найбільш масове застосування в повітряних мережах високої напруги. Висока експлуатаційна надійність у поєднанні з ефектом самоконтролю обумовлюється гартуванням скляних деталей в процесі її виготовлення. Разом з тим контроль якості склодеталей обмежується візуальним оглядом поверхневого шару скла на предмет наявності різного роду дефектів. Існуючі методи визначення залишкової напруги в локальних крапках або оптичні методи малоефективні в умовах поточного виробництва.

Пропонується кількісна методика оцінки якості гартування склодеталей, заснована на статистичному аналізі прочностних характеристик деталей і кінцевої продукції - ізоляторів. Показано, що між стійкістю склодеталей до ударних дій і механічною міцністю ізоляторів існує статистична кореляція, яка може бути виражена на основі нормального закону розподілу випадкових величин. Рекомендується нормувати ударну міцність склодеталей і ввести з методом випробування у відповідний стандарт по технічних вимогах складових елементів ізолятора.

Ключові слова: скляний ізолятор, склодеталь, гартування, методи вимірювання залишкової напруги, ударна міцність, міцність на розтягнення, статистична кореляція, нормальний розподіл.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол Є. І.*

UDC 631.331.3

Y. D. KIM (HVRI)

High Voltage Research Institute, General Batyuk St., 22, Slovyansk, Donetsk Region, Ukraine, 84121, e-mail: ykim@meta.ua

METHOD OF ASSESSING THE QUALITY OF TEMPERING OF THE GLASS PARTS OF THE HIGH VOLTAGE LINE INSULATORS

Glass insulators, that due to unique properties «self to identify» in the case of damage of dielectric, but here to save mechanical strength of construction, got the most application in the air high-voltage lines. High operating reliability in combination with the effect of self-control is caused by hardening of glass element in the process of its making. At the same time control of quality of glass element is limited to visual examination of superficial layer of glass for the purpose the presence of different sort of defects. The known methods of determination of residual tensions in local points or optical methods are ineffective in the conditions of mass production.

The quantitative method of estimation of quality of tempering of glass element, based on the statistical analysis of strength characteristics of details and eventual products - insulators is offered. It is shown that between stability of glass element to impact influences and mechanical strength of insulators there is statistical correlation which can be expressed on the basis of normal distribution of the random variables. It is recommended to normalize the impact strength of glass element and the test method in the relevant standard specifications for the constituent elements of the insulator to include.

Keywords: glass insulator, toughened glass element, methods of measuring of residual tension, impact strength, tensile strength, statistical correlation, normal distribution.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Sokol E. I.*