

УДК 621.7.044+629.7

М.К. КНЯЗЕВ<sup>1</sup>, О.Б. КИВИРЕНКО<sup>1</sup>, А.Б. ШОПЕН<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>ООО «Научно-производственное предприятие ПЛАСТАР», Харьков, Украина

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯТОРОВ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ

Проведен анализ условий работы изоляторов электродов в разрядной камере. Рассмотрены механизмы их разрушения при воздействии высоких импульсных давлений и температур. Выполнена оценка стойкости различных материалов при разрядах с относительно низким и высоким напряжением. Установлено, что полиэтиленовые изоляторы обладают высокой стойкостью при относительно низком зарядном напряжении (до 10 кВ), однако при высоких напряжениях (15 – 35 кВ) стойкость резко снижается. Стеклопластиковые электроды обладают более высокой стойкостью при высоком напряжении. Проведен анализ, который позволил определить механизм разрушения стеклопластикового изолятора и существенную роль угла намотки ровинга на сопротивление действию ударной волны. Установлено, что при постоянной подаче ровинг укладывается на токоведущий стержень с малым углом к его оси. При такой укладке воздействие ударной волны приводит к разрушению и вымыванию связующего между волокнами. Предложены процессы намотки с переменной подачей для обеспечения постоянного оптимального угла укладки ровинга и переменного угла с оптимизацией по диаметру изолятора. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологии намотки

**Ключевые слова:** стеклопластик, намотка, угол укладки ровинга, подача, электрод, разряд, ударная волна.

### Введение

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГШ), один из способов импульсного ресурсосберегающего формообразования листовых деталей, переживает второй подъем и находит все более широкое применение в условиях единичного, мало- и среднесерийного производства.

Широкому применению ЭГШ в крупносерийном производстве препятствуют относительно большой цикл обработки и низкая стойкость изолированных изоляторов, размещаемых в разрядных камерах и подвергаемых воздействию высокого импульсного давления и точечной высокой температуры.

Сокращение цикла обработки обеспечивают совмещением вспомогательных процессов, применением штамповки без слива воды и другими приемами [1].

Однако проблема обеспечения достаточной стойкости изолятора электродов до настоящего времени не решена. По оценкам специалистов достаточной стойкостью считается длительность работы без отказов в течение одной смены – 8 часов непрерывной работы при уровне выделяемой энергии 2–10 килоджоулей и зарядном напряжении 15 – 30 киловольт. Это означает, что изолятор должен выдерживать 3 – 5 тысяч разрядов при допустимом износе,

который существенно не снижает эффективность разрядов (существенно не повышает предпробойные потери).

Производственники считают, что ремонт и замену изоляторов или электродов в целом можно произвести по окончании смены без ущерба для производственного процесса.

В настоящей работе поставлена цель повысить стойкость стеклопластиковых изоляторов, получаемых способом намотки. Для этого необходимо выполнить анализ условий работы изолятора электрода, вскрыть механизм его разрушения и предложить технические решения, позволяющие увеличить длительность его работы.

### 1. Материалы изолятора и механизмы его разрушения

Вопросы повышения стойкости электродов и уменьшения потерь рабочего времени, связанного с заменой электродов, решаются несколькими путями: а) применением новых материалов и конструкций; б) уменьшением времени замены электрода при низкой его стойкости; в) применением инициированного разряда; г) использованием рабочих сред, увеличивающих срок службы электрода и т.п. [2].

Наиболее распространенными в настоящее время являются два первых направления. Примене-

ние инициированного разряда при всех его преимуществах перед пробоем разрядного промежутка сдерживается из-за отсутствия компактного и достаточно надежного механизма автоматической подачи инициатора.

Стойкость полиэтиленовых изоляторов на прессах «Удар-12» при напряжении 10 кВ, емкости конденсаторов 200 мкФ и индуктивности разрядного контура 1,6 мкГн была невысокой, до 500 разрядов. Применение новой конструкции изолятора с водяным зазором вокруг токоведущего стержня обеспечило повышение стойкости в 8 – 10 раз.

Разрушение полиэтиленовых изоляторов при относительно низком зарядном напряжении (до 10 – 15 кВ) начинается с образования углеродистых дорожек, по которым развиваются стримеры и проходит канал разряда. Затем наступает стадия механического разрушения.

Применение полиэтиленовых изоляторов оправдано для относительно низкого зарядного напряжения и выделяемой энергии (до 10 кДж). При таких условиях стойкость составляет примерно 5 тысяч разрядов [2].

Однако при работе на более высоких напряжениях (15 – 35 кВ) стадия механического разрушения полиэтиленовых изоляторов наступает очень быстро, уже после 300 – 500 разрядов даже при относительно малой энергии разрядов (4 – 6 кДж). Это связано с тем, что величина пикового давления в ударной волне, генерируемой каналом разряда, примерно пропорциональна величине зарядного напряжения. Полиэтилен – низкопрочный и пластичный материал. Однако при высокоскоростном нагружении полиэтилен ведет себя как хрупкий материал и, обладая малой прочностью, разрушается через малое количество разрядов даже при работе на сжатие. Здесь единственным преимуществом полиэтилена является возможность его повторного использования для изготовления изолятора.

В качестве изоляторов в ЭГШ использовали также вакуумную резину. Однако она имеет те же недостатки, что и полиэтилен при работе на высоких напряжениях.

Высокое напряжение разряда позволяет получать более интенсивные ударные волны, что существенно расширяет технологические возможности ЭГШ. Установлено, что в таких условиях более высокой стойкостью обладают стеклопластики при их относительно низкой стоимости.

## 2. Анализ условий работы и механизмов разрушения стеклопластикового изолятора

При появлении и развитии канала электроразряда на начальной стадии от него отходит ударная

волна высокой интенсивности с пиковым давлением в десятки и, даже, сотни атмосфер. Известно, что максимальная напряженность электрического поля возникает на границе перехода от оголенной поверхности токоведущего стержня к изолятору [3]. Поэтому канал разряда проходит вплотную к поверхности изолятора (рис. 1), подвергая его воздействию высоких температур и давлений.

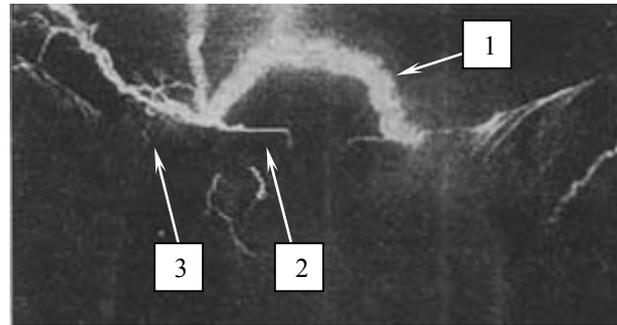


Рис. 1. Электрический высоковольтный разряд между двумя электродами:

1 – канал электроразряда; 2 – оголенная часть токоведущего стержня; 3 – изолятор

Высокое импульсное давление подвергает электрод общему силовому нагружению, а также локальному импульсному удару потоком жидкости (воды). В рассматриваемой постановке задачи рабочий конец электрода можно считать консольно жестко закрепленной балкой под воздействием распределенной неравномерной неосесимметричной нагрузки (рис. 2). Прилагаемая нагрузка (эпюра давления) носит относительный характер, построена по примерному соотношению пиковых давлений ударной волны на различных участках изолятора. Здесь нужно учитывать, что пиковые нагрузки прилагаются к поверхности изолятора не одновременно: сначала воздействию ударной волны интенсивностью  $P_1$  подвергается торцовый участок площадью  $A_1$ , затем нагрузка  $P_2$  распространяется на боковой участок площадью  $A_2$ . Это соответствует пространственному расположению канала разряда относительно электродов (см. рис. 1). Процесс нагружения прямой ударной волной быстротечный и занимает всего лишь до нескольких десятков микросекунд. За это время давление возрастает от статического в жидкости до пикового, а затем более плавно снижается опять до статического давления в разрядной камере. Здесь не учитывается действие отраженных ударных волн и других энергосиловых факторов.

В начальный момент электрод подвергается неосесимметричному сжатию, что вызывает его изгиб. По мере распространения ударной волны вдоль поверхности изолятора усилие нагружения становится поперечным и напряжения изгиба увеличиваются.

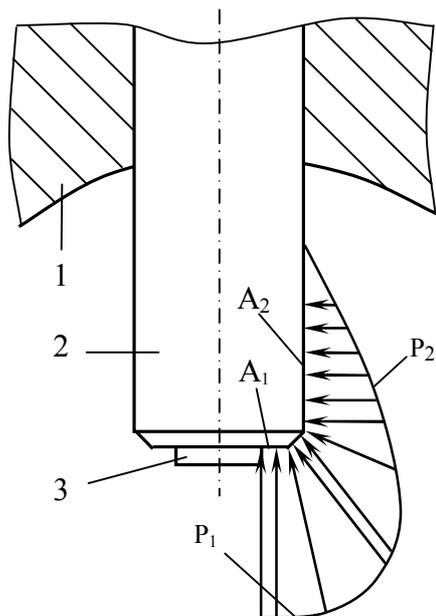


Рис. 2. Приведенная схема нагружения электрода ударной волной:

1 – корпус разрядной камеры; 2 – изолятор; 3 – токоведущий стержень;  $A_1$  – площадь торцового участка изолятора, нагружаемая давлением  $P_1$ ;

$A_2$  – площадь боковой поверхности изолятора, нагружаемая давлением  $P_2$

При определенном соотношении прочностных характеристик рабочей части электрода и нагружающего импульса высокие изгибные напряжения превышают допустимые и приводят к пластической деформации токоведущего металлического стержня и разрушению (трещине) стеклопластикового изолятора, как менее пластичного по сравнению с металлом, по сечению у основания закрепления. В этом случае проблему прочности решают путем увеличения диаметра стержня и, иногда, увеличением толщины (наружного диаметра) изолятора.

Так, в разрядных камерах серийного пресса ПЭГ-25, оснащенных одной парой электродов, при диаметре стального токоведущего стержня 10 мм разрушение электрода от изгиба происходило через 100 – 150 разрядов при работе с энергией близкой к максимальной (25 кДж) и максимальным вылетом рабочего конца в наибольшей разрядной камере. Диаметр стержня увеличили до 12 мм без изменения наружного диаметра изолятора и этого оказалось достаточно.

В многоэлектродном технологическом блоке опытной установки УЭГШ-2 при применении стальных стержней диаметром 10 и 12 мм его пластический изгиб и нарушение сплошности изолятора происходили через 400 – 600 разрядов при энергиях 5 – 10 кДж и напряжениях 15 – 35 кВ. Здесь диаметр стержня увеличили до 16 и даже 20 мм с увеличени-

ем наружного диаметра изолятора с 38 до 42 мм.

Разрушения по торцевой поверхности изолятора имеют другие механизмы и их невозможно устранить простыми конструктивными способами.

Как видно на рис. 1 канал разряда проходит по торцевой поверхности изолятора. Ни один из известных материалов не может выдержать воздействие высокой температуры разряда (10 – 20 тысяч Кельвин). Высокая температура приводит к деструкции материала поверхностного слоя изолятора: диссоциация молекул стекловолокон и связующего, испарение, эрозия, нарушение адгезионных связей и другие процессы.

Разрушение торцевой поверхности под действием высоких импульсных давлений усиливается следующими факторами. Упругие деформации электрода вызывают нарушение адгезионной связи между стеклопластиком и токоведущим стержнем. Это приводит к вымыванию связующего между стержнем и внутренней поверхностью изолятора с образованием каверн в дополнение к тем, которые образовались из-за термического воздействия. Схлопывание каверн, которые заполняются газами, выделившимися при разряде, приводит к кумулятивному эффекту и ускоренному разрушению изолятора вдоль стержня электрода (рис. 3).



Рис. 3. Разрушение торца изолятора, характерное для вертикального расположения электрода

Структура стеклопластикового изолятора также способствует разрушению по границе контакта стержня и изолятора. При намотке стекляннного ровинга с постоянной подачей каретки угол намотки различен для внутренних и наружных слоев (угол намотки определяется как угол между касательной к винтовой линии намотки осью изделия). Причем для малого диаметра, определяемого диаметром стержня, угол намотки  $\alpha_c$  гораздо меньше, чем  $\alpha_n$  для большого наружного диаметра, определяемого по-

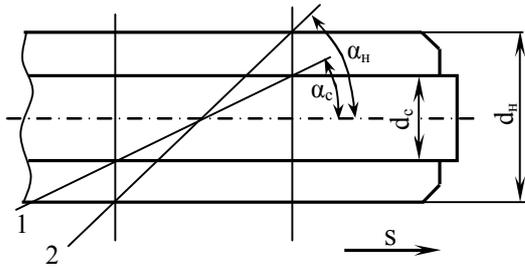


Рис. 4. Схема к определению углов укладки ровинга: 1 – касательная к винтовой линии ровинга на внутреннем диаметре изолятора; 2 – касательная к линии ровинга на наружном диаметре;  $s$  – подача каретки для укладки ровинга;  $d_c$  – диаметр стержня;  $d_{н}$  – наружный диаметр изолятора;  $\alpha_c$  – угол намотки ровинга на внутреннем диаметре изолятора;  $\alpha_n$  – угол намотки ровинга на наружном диаметре

требной толщиной изоляции (рис. 4). Это означает, что ровинг по внутреннему диаметру укладывается под малым углом к оси стержня и торцевая поверхность изолятора формируется торцами перерезанных стеклонитей с соответствующим заполнением промежутков между ними связующим. При воздействии импульса давления в торец нитей они распушиваются, связующее вымывается потоком жидкости, и образуются каверны, в которых собираются газы и воздух. При последующих разрядах процесс разрушения интенсифицируется за счет эффекта кумуляции на газовых полостях, образовавшихся по торцу изолятора вблизи стержня.

Наружные слои, в отличие от внутренних, имеют большую окружную направленность, то есть, расположены поперек линии действия ударной волны. Они «защищают» связующее от вымывания, препятствуют образованию каверн и, соответственно, имеют большую стойкость, что подтверждается типовым образцом на рисунке 3.

### 3. Оптимизация структуры и технологии намотки стеклопластикового изолятора

Проведенный анализ показал несовершенство структуры изолятора, получаемого намоткой с постоянной подачей, для условий работы электрода в составе разрядной камеры оборудования ЭГШ.

Для повышения стойкости изолятора необходимо, как минимум, выдержать угол укладки ровинга  $\alpha_{\text{опт}}$  постоянным и оптимизированным по параметрам изгибной прочности и стойкости к воздействию ударной волны. Для этого необходимо выполнить условие кинематической связи между подачей  $s$  и диаметром изолятора  $d$  в процессе намотки

$$\alpha_{\text{опт}} = \text{const}; s = \pi d / \text{tg} \alpha_{\text{опт}}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, чтобы сохранить угол

укладки ровинга постоянным, нужно пропорционально увеличивать подачу с увеличением диаметра намотки.

Еще большего эффекта можно добиться, если угол намотки  $\alpha_n$  на большом диаметре сделать малым (близким к нулю), а угол  $\alpha_c$  на малом диаметре сделать близким к  $90^\circ$ . При этом наружные слои будут лучше воспринимать изгибные напряжения, так как волокна ровинга будут расположены почти параллельно оси электрода, а внутренние слои будут лучше работать под импульсной нагрузкой со стороны ударной волны.

В этом случае условие кинематической связи между подачей  $s$  и диаметром изолятора  $d$  в общем виде можно представить как

$$\alpha = \text{var}; s = \pi d / \text{tg} \alpha(d). \quad (2)$$

Функциональная зависимость  $\alpha(d)$  в уравнении (2) должна быть оптимизирована по результатам экспериментальных исследований. Не менее важно также определить оптимальные предельные значения угла намотки, соответствующие предельным значениям диаметра  $\alpha(d_c) = \alpha_{c\text{-опт}}$  и  $\alpha(d_n) = \alpha_{n\text{-опт}}$ .

Технология намотки стеклопластиковых изоляторов и применяемые материалы (ровинг, связующее, отвердитель) должны учитывать особенности ЭГШ и специфические условия работы электродов. Во-первых, изоляторы должны обладать высокой электрической прочностью, а она существенно зависит от отсутствия или наличия пор и их вида (открытые или закрытые). Для повышения электрической прочности необходимо обеспечить хорошую пропитку ровинга и вытеснение из него воздуха в процессе намотки. Также необходимо использовать такие связующее и отвердитель, которые не выделяют газы процессе полимеризации. Кроме того, связующее и отвердитель не должны содержать компонентов, которые могут резко снизить электрическую прочность при воздействии высокого напряжения.

Связующее должно иметь высокую адгезию к ровингу для обеспечения высокой прочности стеклопластика. С целью обеспечения высокой ударной прочности применяют добавки пластификаторов.

### Заключение

В работе рассмотрены условия работы изоляторов электродов ЭГШ. Проведен анализ механизмов разрушения изоляторов и определяющих факторов. Определены направления оптимизации структуры стеклопластиков и технологии их намотки. Установлено, для обеспечения оптимального постоянного угла укладки ровинга необходимо изменять подачу в процессе намотки. Большой стойкости изолятора можно добиться, если угол намотки на большом

диаметре сделать малым, а угол на малом диаметре сделать близким к  $90^\circ$ .

Для определения оптимальных углов намотки  $\alpha_{\text{опт}}$ ,  $\alpha_{\text{с-опт}}$ ,  $\alpha_{\text{н-опт}}$  и функциональной зависимости  $\alpha(d)$  необходимо провести экспериментальные исследования при различных условиях разрядов.

### Литература

1. Голованова М.А. Efficiency improvements of batch production of sheet parts with method of

*electrohydroimpulse forming* / М.А. Голованова, Б. Гонсалес, М.К. Князев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 11 (47). – С. 232-239.

2. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого – М.: Машиностроение, 1977. – 320 с.

3. Наугольных К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

Поступила в редакцию 29.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ІЗОЛЯТОРІВ З СКЛОПЛАСТИКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОГІДРОІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ

*М.К. Князев, О.Б. Ківиренко, О.Б. Шопен*

Проведено аналіз умов роботи ізоляторів електродів в розрядній камері. Розглянуто механізми їх руйнування при дії високих імпульсних тисків і температур. Виконано оцінку стійкості різних матеріалів при розрядах з відносно низькою і високою напругою. Установлено, що поліетиленові ізолятори мають високу стійкість при відносно низькій зарядній напрузі (до 10 кВ), однак при високих напругах (15-35 кВ) стійкість різко знижується. Склопластикові електроди мають більш високу стійкість при високій напрузі. Проведено аналіз, який дозволив визначити механізм руйнування склопластикового ізолятора і суттєву роль кута намотки ровінга в опорі дії ударної хвилі. Встановлено, що при постійній подачі ровінг укладається на струмоведучий стержень з малим кутом до його осі. При такій укладці дія ударної хвилі приводить до руйнування та вимивання зв'язуючого поміж волокнами. Запропоновано процеси намотки зі змінною подачею для забезпечення постійного оптимального кута укладки ровінга і змінного кута з оптимізацією по діаметру ізолятора. Розроблено рекомендації щодо удосконалення технології намотки.

**Ключові слова:** склопластик, намотка, кут укладки ровінга, подача, електрод, розряд, ударна хвиля

### OPTIMISATION OF FIBREGLASS INSULATORS STRUCTURE FOR ELECTROHYDROIMPULSE FORMING

*М.К. Князев, О.Б. Кивиренко, О.Б. Шопен*

Analysis of operation conditions of electrodes insulators in discharge chamber is performed. Mechanisms of their destruction under the action of high impulse pressures and temperatures are considered. Estimation of service life of various materials at discharges with relatively low and high voltage is performed. It is determined that polyethylene insulators possess high endurance at relatively low charge voltage (up to 10 kV); however at high voltage (15-35 kV) the service life is abruptly shortened. Fibreglass electrodes possess higher endurance at high voltage. Analysis, which allowed to determine the mechanism of destruction of fibreglass insulator and essential role of roving wind angle in resistance to action of shock wave, was conducted. It is determined that at constant feed of winding the roving is laid on current-conductive rod at small angle to its axis. At such a winding the action of shock wave causes destruction and washing-out of binding agent between fibres. Processes for winding with varying feed value for providing the permanent optimal wind angle of roving and varying angle with optimisation along insulator diameter are suggested. Recommendations on improvements of winding technology are developed.

**Key words:** fibreglass, winding, roving winding angle, feed, electrode, discharge, shock wave

**Князев Михаил Климович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: knyazev@yandex.ru.

**Кивиренко Олег Борисович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационного материаловедения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kivirenko@mail.ru.

**Шопен Александр Борисович** – главный инженер ООО «Научно-производственное предприятие ПЛАСТАР», Харьков, Украина, e-mail: absh@kharkov.ukrtel.net.