



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

C03C 15/00 (2019.02); C03C 2203/50 (2019.02); C03C 23/0095 (2019.02); B65D 1/0207 (2019.02)

R U
2 6 9 1 1 8 9
C 2
9 8 1 1 9 2
U

(21)(22) Заявка: 2017110800, 04.09.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.09.2015Дата регистрации:
11.06.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
05.09.2014 US 62/046,208

(43) Дата публикации заявки: 05.10.2018 Бюл. № 28

(45) Опубликовано: 11.06.2019 Бюл. № 17

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 05.04.2017(86) Заявка РСТ:
US 2015/048592 (04.09.2015)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2016/037083 (10.03.2016)Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Большая Спасская, д. 25,
строение 3, ООО "Юридическая фирма
Городисский и Партнеры"

(72) Автор(ы):

ДЕМАРТИНО Стивен Эдвард (US),
ЭЛЛИСОН Адам Джеймс (US),
ХОФФ Кайл Кристофер (US)

(73) Патентообладатель(и):

КОРНИНГ ИНКОРПОРЕЙТЕД (US)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2127711 C1, 20.03.1999. WO
2012151459 A1, 08.11.2012. US 20130133366 A1,
30.05.2013. WO 2013006750 A2, 10.01.2013. EP
2762461 A1, 06.08.2014.

(54) СТЕКЛЯННЫЕ ИЗДЕЛИЯ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТЕКЛЯННЫХ
ИЗДЕЛИЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к стеклянному изделию. Стеклянное изделие может включать стеклянный корпус, имеющий первую поверхность и вторую поверхность. Первая поверхность стеклянного корпуса включает группу дефектов, проходящих от первой поверхности в толщину стеклянного корпуса с максимальной начальной глубиной дефекта A_i . Первая поверхность стеклянного корпуса может подвергаться травлению до глубины, составляющей менее чем или равной

приблизительно 25% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности. Когда стеклянное изделие находится под одноосной сжимающей нагрузкой, по меньшей мере часть первой поверхности находится в состоянии напряжения, и предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия составляет более чем или равняется 90% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия. Технический результат – повышение

надежности стеклянного изделия. 2 н. и 13 з.п. ф-
лы, 13 ил., 2 табл.

R U 2 6 9 1 1 8 9 C 2

R U 2 6 9 1 1 8 9 C 2

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

C03C 15/00 (2019.02); C03C 2203/50 (2019.02); C03C 23/0095 (2019.02); B65D 1/0207 (2019.02)

(21)(22) Application: 2017110800, 04.09.2015

(24) Effective date for property rights:
04.09.2015Registration date:
11.06.2019

Priority:

(30) Convention priority:
05.09.2014 US 62/046,208

(43) Application published: 05.10.2018 Bull. № 28

(45) Date of publication: 11.06.2019 Bull. № 17

(85) Commencement of national phase: 05.04.2017

(86) PCT application:
US 2015/048592 (04.09.2015)(87) PCT publication:
WO 2016/037083 (10.03.2016)Mail address:
129090, Moskva, ul. Bolshaya Spasskaya, d. 25,
stroenie 3, OOO "Yuridicheskaya firma
Gorodisskij i Partnery"

(72) Inventor(s):

DEMARTINO Stiven Edvard (US),
ELLISON Adam Dzhejms (US),
KHOFF Kajl Kristofer (US)

(73) Proprietor(s):

CORNING INCORPORATED (US)

C2
9
8
1
1
9
2
RUR U
2 6 9 1 1 8 9
C 2

(54) GLASS ARTICLES AND METHODS OF IMPROVING RELIABILITY OF GLASS ARTICLES

(57) Abstract:

FIELD: manufacturing technology.

SUBSTANCE: invention relates to a glass article. Glass article may include a glass body having a first surface and a second surface. First surface of glass body includes group of defects passing from first surface into thickness of glass body with maximum initial depth of defect A_i . First surface of the glass body can be etched to a depth of less than or equal to approximately 25 %of the maximum initial depth of the defect A_i from a group of defects present on the first surface. When glass article is under uniaxial compressing load, at least part of first surface is in voltage state, and the tensile strength at uniaxial compression of the glass article is more than or equal to 90 % of the ultimate strength at uniaxial compression of the defect-free glass article.EFFECT: high reliability of the glass article.
15 cl, 13 dwg, 2 tbl

Перекрестная ссылка на родственные заявки

[0001] Настоящая заявка испрашивает приоритет в отношении предварительной патентной заявки США № 62/046208, поданной 05 сентября 2014 г. и озаглавленной «Способы повышения надежности стеклянных изделий», которая во всей своей полноте 5 включается в настоящий документ посредством ссылки.

Уровень техники, к которой относится изобретение

Область техники

[0002] Настоящее описание относится, в общем, к стеклянным изделиям и, более конкретно, к способам предотвращения механического разрушения и повышения 10 надежности стеклянных изделий вследствие присутствия дефектов.

Уровень техники

[0003] Стеклянные изделия все больше используются в широком разнообразии потребительских и промышленных изделий, включая смартфоны, планшеты, портативные компьютеры, банкоматы, упаковки для пищевых продуктов и напитков 15 и т. д. Хотя существуют разнообразные технологии повышения прочности стеклянных изделий, всегда присутствует риск того, что стеклянные изделия могут разрушаться вследствие присутствия дефектов в материале. По существу, существует потребность уменьшения вероятности разрушения этих стеклянных изделий.

[0004] Прочность стеклянного изделия определяется историей его повреждений от

20 расплавленной поверхности до использования и приложенного напряжения, испытываемого в процессе использования, включая величину, место и продолжительность напряжения. Это приводит к распределению прочности для любой данной группы изготовленных стеклянных изделий, потому что никакие два стеклянных изделия не имеют одинаковую историю повреждений. В результате этого может 25 оказаться затруднительным прогнозирование вероятностной прочности стеклянного изделия, учитывая, в частности, эту изменчивость распределения прочности.

[0005] Один способ уменьшения изменчивости распределения прочности включает закалку стеклянного изделия после его изготовления, которая обеспечивает, что все 30 поверхностные дефекты находятся в пределах зоны остаточных напряжений сжатия, создаваемой в стеклянном изделии. Способы закалки включают термическую закалку поверхности или химический обмен модифицирующих структуру ионов (т. е. ионообменное упрочнение). Эти процессы ограничены по эффективности уменьшения 35 изменчивости распределения прочности по глубине остаточного напряжения сжатия, которое они способны придавать стеклянному изделию. В частности, глубина остаточного напряжения сжатия зависит от толщины стекла, используемого в изделии, а также от состава стекла. Если глубина напряжения сжатия не превышает наиболее 40 глубокий дефект в стеклянном изделии, обеспечивается небольшая или даже нулевая выгода от остаточного напряжения сжатия в ситуациях воздействия нагрузки. Таким образом, ни один из этих подходов к закалке не может использоваться для эффективного уменьшения изменчивости распределения прочности в случае стеклянных изделий с 45 дефектами, которые распространяются дальше глубины остаточного напряжения сжатия.

[0006] Было показано, что покрытия, в том числе органические и неорганические, уменьшают степень введения повреждений в стеклянные изделия в течение всего срока 45 их службы, и в результате этого уменьшается изменчивость распределения прочности в течение срока службы стеклянного изделия. Однако для эффективного использования покрытий, прежде всего, требуется, чтобы стеклянные изделия изготавливались согласно производственному процессу, в результате которого получаются стеклянные изделия

с соответствующим распределением прочности в течение их предполагаемого применения. Нанесение покрытия лишь сохраняет это распределение прочности в течение всего срока службы изделия, но не уменьшает изменчивость распределения прочности. Таким образом, если в производственном процессе не обеспечивается соответствующее распределение прочности, то покрытие не приведет к уменьшению изменчивости распределения прочности.

[0007] Соответственно, существует потребность в альтернативных способах уменьшения изменчивости распределения прочности в стеклянных изделиях, которое обеспечивает предотвращение механическое разрушение стеклянного изделия и повышение надежности.

Сущность изобретения

[0008] Согласно одному варианту осуществления, стеклянное изделие может включать стеклянный корпус, имеющий первую поверхность и вторую поверхность, противоположную по отношению к первой поверхности. Каждая из первой поверхности и второй поверхности имеет радиус кривизны. Первая поверхность стеклянного корпуса включает группу дефектов, проходящих от первой поверхности в толщину стеклянного корпуса с максимальной начальной глубиной дефекта A_i . Первая поверхность стеклянного корпуса может подвергаться травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 25% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности. Когда стеклянное изделие находится под одноосной сжимающей нагрузкой, по меньшей мере, часть первой поверхности находится в состоянии напряжения, и предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия составляет более чем или равняется 90% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия.

[0009] Согласно еще одному варианту осуществления, способ повышения надежности стеклянных изделий может включать изготовление стеклянного изделия, имеющего первую поверхность, вторую поверхность, противоположную по отношению к первой поверхности, начальную толщину T_i проходящий от первой поверхности ко второй поверхности, и группа дефектов с максимальной начальной глубиной дефекта A_i проходящих от первой поверхности до начальной толщины T_i . Стеклянный материал селективно удаляется с первой поверхности стеклянного изделия и вблизи каждого дефекта в группе дефектов с одинаковой скоростью посредством химической обработки, по меньшей мере, первой поверхности стеклянного изделия при такой температуре и в течение такого времени, что, после химической обработки дефекты, имеющие максимальную начальную глубину дефекта A_i , остаются в стеклянном изделии и имеют после обработки коэффициент концентрации напряжений $K_{t_{pp}}$ на верхушке дефекта, который составляет менее чем начальный коэффициент концентрации напряжений K_{t_i} на верхушке дефекта перед химической обработкой; группа дефектов имеет максимальную глубину дефекта A_{pp} после обработки, которая по существу равняется A_i ; после обработки толщина T_{pp} стеклянного изделия составляет менее чем начальная толщина T_i ; и $|T_{pp} - T_i|$ по существу равняется $|A_{pp} - A_i|$.

[0010] Дополнительные отличительные признаки и преимущества способов предотвращения механического разрушения в стеклянных изделиях и повышения надежности, которые описаны в настоящем документе, будут представлены в подробном описании, которое приводится ниже, и отчасти будут легко понятными для специалистов в данной области техники из данного описания или признанными посредством

практической реализации вариантов осуществления, описанных в настоящем документе, включая подробное описание, которое приводится ниже, формулу изобретения, а также прилагаемые чертежи.

[0011] Следует понимать, что как приведенное выше общее описание, так и следующее 5 подробное описание представляют разнообразные варианты осуществления и предназначаются для обеспечения обзора или основы для понимания природы и характера предмета заявленного изобретения. Сопровождающие чертежи представлены для обеспечения улучшенного понимания разнообразных вариантов осуществления и включаются в качестве части настоящего описания. Чертежи иллюстрируют 10 разнообразные варианты осуществления, описанные в настоящем документе, и вместе с описанием служат для разъяснения принципов и операций предмета заявленного изобретения.

Краткое описание чертежей

[0012] Фиг. 1 схематически иллюстрирует поперечное сечение стеклянного изделия 15 согласно одному или нескольким вариантам осуществления, описанным в настоящем документе;

[0013] фиг. 2 схематически иллюстрирует поперечное сечение стеклянного изделия на фиг. 1;

[0014] фиг. 3 схематически иллюстрирует стеклянное изделие на фиг. 1, расположенное 20 в устройстве для определения предела прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия;

[0015] фиг. 4 схематически иллюстрирует часть стеклянного изделия с дефектом перед химической обработкой;

[0016] фиг. 5 схематически иллюстрирует часть стеклянного изделия с дефектом 25 после химической обработки;

[0017] фиг. 6А схематически иллюстрирует увеличенное изображение дефекта на фиг. 1;

[0018] фиг. 6В схематически иллюстрирует увеличенное изображение дефекта на фиг. 2;

[0019] фиг. 7 графически иллюстрирует потеря массы как функцию времени для стеклянного изделия, подвергнутого травлению раствором 1 М фтористоводородной кислоты и 4 М хлористоводородной кислоты;

[0020] фиг. 8А и 8В представляют полученные методом сканирующей электронной 35 микроскопии (СЭМ) микрофотографии, иллюстрирующие поверхность разлома и начало разрушения необработанного стеклянного изделия;

[0021] фиг. 9А и 9В представляют полученные методом СЭМ микрофотографии, иллюстрирующие поверхность разлома и начало разрушения химически обработанного стеклянного изделия;

[0022] фиг. 10А и 10В представляют полученные методом СЭМ микрофотографии, 40 иллюстрирующие поверхность разлома и начало разрушения химически обработанного стеклянного изделия;

[0023] фиг. 11А и 11В представляют полученные методом СЭМ микрофотографии, иллюстрирующие поверхность разлома и начало разрушения химически обработанного стеклянного изделия;

[0024] фиг. 12 графически иллюстрирует распределение Вейбулла (Weibull) для 45 прочности (ось у) как функцию нагрузки при разрушении (ось x) в случае необработанных стеклянных изделий и химически обработанных стеклянных изделий; и

[0025] фиг. 13 графически иллюстрирует процентную долю разрушений при одноосном сжатии, возникающих в индуцированном повреждении (ось у) как функцию продолжительности химической обработки (ось х).

Подробное описание

[0026] Далее будут подробно рассмотрены варианты осуществления стеклянных изделий и способов предотвращения механическое разрушение стеклянных изделий, примеры которых проиллюстрированы на сопровождающих чертежах. Когда это является возможным, одинаковые условные номера будут использоваться на всех чертежах для обозначения одинаковых или аналогичных деталей. Согласно одному варианту осуществления, стеклянное изделие может включать стеклянный корпус, имеющий первую поверхность и вторую поверхность, противоположную по отношению к первой поверхности. Каждая из первой поверхности и второй поверхности имеет радиус кривизны. Первая поверхность стеклянного корпуса включает группу дефектов, проходящих от первой поверхности в толщину стеклянного корпуса с максимальной начальной глубиной дефекта A_i . Первая поверхность стеклянного корпуса может подвергаться травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 25% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности. Когда стеклянное изделие находится под одноосной сжимающей нагрузкой, по меньшей мере, часть первой поверхности находится в состоянии напряжения, и предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия составляет более чем или равняется 90% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия. Разнообразные варианты осуществления стеклянных изделий и способов предотвращения механического разрушения стеклянных изделий и повышения надежности стеклянных изделий будут описаны в настоящем документе с конкретными ссылками на сопровождающие чертежи.

[0027] Традиционно преобладающий способ уменьшения изменчивости распределения прочности в группе стеклянных изделий заключался в том, чтобы конструировать стеклянные изделия, учитывая в сценарии дефектов «наихудший случай». В частности, максимальный размер группы дефектов, возникающих в стеклянном изделии в процессе его производства или последующей обработки, может статистически определяться посредством исследования статистически значимой группы стеклянных изделий, на которые воздействовали одинаковые условия производства и/или обработки.

[0028] Когда определяется максимальный размер дефекта в стеклянном изделии, может быть предложена восстановительная обработка, такая как обработка посредством травления или аналогичная обработка, чтобы удалять стеклянный материал с поверхности стеклянного изделия до глубины, составляющей менее чем максимальный размер дефекта в стеклянном изделии, эффективно удаляя всю группу дефектов из стеклянного изделия. Во многих случаях конструкция стеклянного изделия будет пересмотрена с учетом этой потери материала посредством увеличения толщины стекла таким образом, что конечное изделие находится в пределах технических условий в отношении толщины последней обработки для удаления группы дефектов.

[0029] Хотя такая технология является эффективной для уменьшения изменчивости распределения прочности в группе стеклянных изделий, в конечном счете, она значительно увеличивает стоимость стеклянного изделия за счет необходимости дополнительного стеклянного материала в конструкции для возмещения потери материала в процессе какой-либо восстановительной обработки.

[0030] Способы, описанные в настоящем документе, уменьшают изменчивость распределения прочности в группе стеклянных изделий без удаления стеклянного

материала с поверхности стеклянного изделия до глубины, составляющей более чем или равно максимального размера дефекта в стеклянном изделии. Таким образом, способы, описанные в настоящем документе, не полностью удаляют группу дефектов с поверхности стеклянного изделия.

5 [0031] Далее рассмотрим фиг. 1 и 2, на которых схематически проиллюстрировано стеклянное изделие 100 согласно одному варианту осуществления. Стеклянное изделие 100 включает стеклянный корпус 101, имеющий первую поверхность 106, вторую поверхность 108 и толщину T_1 , проходящую от первой поверхности 106 до второй поверхности 108. Согласно вариантам осуществления, стеклянное изделие 100 может 10 иметь изогнутую геометрическую форму, такую как форма стержнеобразного или цилиндрического стеклянного изделия 100. Например, согласно вариантам осуществления, стеклянное изделие 100 может иметь изогнутую геометрическую форму с по существу непрерывными боковыми стенками, по меньшей мере, частично 15 заключающими в себе внутренний объем, например, в том случае, когда стеклянное изделие 100 представляет собой стеклянный контейнер, который проиллюстрирован на фиг. 1. Стеклянный контейнер может использоваться для хранения пищевых продуктов или напитков, или даже в качестве упаковки для лекарственного средства. Например, согласно некоторым вариантам осуществления, в качестве стеклянного контейнера может присутствовать флакон, вакуумный контейнер Vacutainer®, картридж, 20 шприц, ампула, бутылка, колба, склянка, пробирка, стакан или аналогичный предмет, включая как стеклянные контейнеры, имеющие круглую форму, и стеклянные контейнеры, имеющие некруглую форму. Согласно этим вариантам осуществления, первая поверхность 106 стеклянного изделия 100 может представлять собой наружную поверхность стеклянного контейнера, и вторая поверхность 108 может представлять собой внутреннюю поверхность стеклянного контейнера. Кроме того, первая 25 поверхность 106 стеклянного изделия 100 может иметь первый радиус кривизны r_1 , который измеряется от длинной оси 103 стеклянного изделия 100, и вторая поверхность 108 стеклянного изделия 100 может иметь второй радиус кривизны r_2 , который также 30 измеряется от длинной оси 103 стеклянного изделия 100. Второй радиус кривизны r_2 может быть таким же, как первый радиус кривизны r_1 , или, в качестве альтернативы, второй радиус кривизны r_2 может отличаться от первого радиуса кривизны r_1 .

35 [0032] Согласно вариантам осуществления, в том случае, где стеклянное изделие 100 представляет собой стеклянный контейнер, который проиллюстрирован на фиг. 1 и 2, стеклянное изделие 100 имеет предел прочности при одноосном сжатии. Согласно вариантам осуществления, предел прочности при одноосном сжатии может измеряться посредством использования, например, устройства для испытания при горизонтальном сжатии, описанного в параграфе [00149] находящейся на рассмотрении патентной заявки США № 13/780740, поданной 28 февраля 2013 г. и озаглавленной «Стеклянные 40 изделия с антифрикционными покрытиями». В частности, как представляет фиг. 3 настоящего описания, предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия 100 может измеряться посредством помещения стеклянного изделия 100 между двумя противоположными пластинами 202, 204 устройства таким образом, что длинная ось 103 стеклянного изделия является, как правило, перпендикулярной приложенной 45 сжимающей нагрузке (схематически представлено стрелками 300, 302), которая прилагается к стеклянному изделию 100 пластинами 202, 204. После этого, по меньшей мере, одна из пластин 202, 204 перемещается по направлению к другой пластине для приложения сжимающей нагрузки к стеклянному изделию 100. Когда стеклянное изделие

100 находится в состоянии сжатия, по меньшей мере, часть первой поверхности 106 стеклянного корпуса 101 находится в состоянии напряжения. Например, когда стеклянное изделие 100 находится в состоянии сжатия, по меньшей мере, область 107 первой поверхности 106 стеклянного изделия 100 находится в состоянии напряжения.

- 5 Сжимающая нагрузка, которая прилагается к стеклянному изделию 100 пластинаами 202, 204, дополнительно увеличивается до тех пор, пока стеклянное изделие 100 не разрушается в процессе разлома. Сжимающая нагрузка, которая прилагается при разрушении, рассматривается как предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия. Согласно вариантам осуществления, в которых сжимающая нагрузка 10 прилагается, как правило, перпендикулярно по отношению к длинной оси стеклянного изделия, предел прочности при одноосном сжатии может также называться термином «прочность при горизонтальном сжатии».

[0033] Хотя фиг. 3 иллюстрирует сжимающую нагрузку, которая прилагается, как правило, в направлении, перпендикулярном по отношению к длинной оси 103

- 15 стеклянного изделия 100, таким образом, что часть первой поверхности 106 стеклянного изделия 100 находится в состоянии напряжения, следует понимать, что предусматриваются и являются возможными другие способы определения предела прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия 100. Например, согласно некоторым вариантам осуществления (не представлены на чертежах), предел прочности 20 при одноосном сжатии стеклянного изделия 100 может определяться посредством ориентирования стеклянного изделия 100 между пластинаами 202, 204 таким образом, что длинная ось 103 стеклянного изделия 100 является параллельной по отношению к прилагаемой сжимающей нагрузке. Согласно данному варианту осуществления, по меньшей мере, часть первой поверхности 106 стеклянного изделия 100 находится в 25 состоянии напряжения в течение приложения сжимающей нагрузки, например, в том случае, когда стенка стеклянного изделия изгибается в радиальном направлении наружу. Согласно данному варианту осуществления, часть первой поверхности 106 стеклянного изделия 100 вокруг всей периферии стеклянного изделия 100 находится в состоянии напряжения.

- 30 [0034] Согласно некоторым вариантам осуществления, стеклянные изделия описанные в настоящем документе изготавливаются из алюмосиликатных стеклянных композиций, таких как стеклянные композиции, которые описывает патент США № 8980777, патент США № 8551898 или патент США № 8753994. В качестве альтернативы, стеклянные изделия могут изготавливаться из боросиликатных стеклянных композиций, таких как 35 традиционные боросиликатные стекла типа I класса A или класса B согласно стандарту ASTM E438-92 (2011) или даже стеклянные композиции типа II согласно стандарту ASTM E438-92 (2011). Однако следует понимать, что конкретный тип стеклянной композиции, из которой изготавливаются стеклянные изделия, не ограничивается определенным образом, и что предусматриваются также и другие подходящие 40 стеклянные композиции.

- [0035] Далее рассмотрим фиг. 4 и 6А, которые представляют, согласно вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, стеклянные изделия 100, включающие группу дефектов, по меньшей мере, на первой поверхности 106 стеклянного изделия 100. Как правило, присутствие группы дефектов уменьшает предел прочности 45 при одноосном сжатии стеклянного изделия по сравнению с бездефектным стеклянным изделием. При использовании в настоящем документе терминами «бездефектный стеклянный корпус» и «бездефектное стеклянное изделие» обозначаются теоретическое стеклянное изделие или стеклянный корпус, которые изготавливаются из такого же

материала и имеющие такие же формы и размеры, как рассматриваемые стеклянное изделие или стеклянный корпус, но в которых совершенно отсутствуют дефекты. Группа дефектов проходит от первой поверхности 106 в толщину T_i стеклянного изделия 100 по направлению ко второй поверхности 108. Каждый дефект 102 в группе дефектов имеет глубину дефекта, которая составляет менее чем или равняется максимальной начальной глубине дефекта A_i , которая измеряется от первой поверхности 106

5 стеклянного изделия до верхушки 110 дефекта 102. Согласно вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, каждый дефект 102 описывается как эллиптическая трещина. То есть дефект 102 имеет форму полуэллипса, имеющего большую ось $2A_i$ и

10 малую ось $2d_i$. Таким образом, каждый дефект проходит в толщину T_i стеклянного изделия 100 на глубину, которая составляет менее чем или равняется A_i . Начальный радиус кривизны r_i у верхушки 110 дефекта 102 представляет собой функцию ширины

15 и глубины трещины таким образом, что $r_i = d_i^2 / A_i$.

[0036] Согласно вариантам осуществления, максимальная начальная глубина дефекта A_i для данной группы стеклянных изделий, на которые воздействуют идентичные условия производства, обработки и применения (и, таким образом, воздействуют одинаковые механические факторы, в результате которых потенциально образуются

20 дефекты), может определяться посредством исследования статистически значимого подмножества группы стеклянных изделий для определения распределения глубины дефектов для целой группы. Максимальная начальная глубина дефекта A_i может определяться непосредственно по распределению глубины дефектов.

[0037] Каждый дефект 102 имеет начальный коэффициент концентрации напряжений K_{t_i} . Начальный коэффициент концентрации напряжений K_{t_i} представляет собой безразмерный коэффициент, который связан с величиной напряжения в материале, окружающем верхушку 110 дефекта и, по существу, непосредственно связан с предрасположенностью дефекта 102 к распространению через материал, что приводит, в конечном счете, к разрушению стеклянного изделия 100. В частности, повышенные значения начального коэффициента концентрации напряжений K_{t_i} показывает большее растягивающее напряжение в материале и более высокую предрасположенность к распространению трещин, особенно когда внутренние остаточные растягивающие напряжения сочетаются с прилагаемыми внешними напряжениями, которые

30 воздействуют на стеклянное изделие. Начальный коэффициент концентрации напряжений K_{t_i} обратно пропорционален начальному радиусу кривизны r_i на верхушке 110 дефекта 102. То есть начальный коэффициент концентрации напряжений K_{t_i} увеличивается для дефекта 102, имеющего малый начальный радиус кривизны r_i на верхушке 110 дефекта 102 и уменьшается для дефекта 102, имеющего относительно больший начальный радиус

35 кривизны r_i на верхушке 110 дефекта 102.

[0038] Снова рассмотрим фиг. 4, где стеклянные изделия 100 дополнительно включают поврежденную трещиной зону 104, которая окружает дефект 102. Поврежденная трещиной зона 104 проходит на начальную толщину T_i материала до глубины, составляющей более чем или равной максимальной начальной глубине дефекта A_i для

40 дефекта 102. Кроме того, поврежденная трещиной зона 104 имеет ширину, составляющую более чем ширина $2d_i$ дефекта 102. Стеклянный материал в пределах поврежденной трещиной зоны 104, имеет такой же состав, как материал в остальной

части стеклянного изделия. Однако, не желая ограничиваться теорией, авторы гипотетически считают, что стеклянный материал в пределах поврежденной трещиной зоны 104 имеет незначительно отличающиеся физические свойства вследствие введения дефекта 102 на первую поверхность 106 стеклянного изделия 100. В частности,

- 5 гипотетически предполагается, что введение дефекта 102 на первую поверхность 106 стеклянного изделия 100 оставляет стеклянный материал, непосредственно прилегающий к дефекту 102 в поврежденной трещиной зоны 104 в более высоком энергетическом состоянии посредством создания растянутых и/или разрушенных молекулярных связей в составляющих компонентах стеклянной структуры. В результате этого гипотетически
- 10 предполагается, что материал, непосредственно прилегающий к дефекту 102 в поврежденной трещиной зоне, находится в более высоком энергетическом состоянии, и в результате этого он оказывается в большей степени подверженным растворению при воздействии средств химической обработки, таких как травильный раствор или аналогичное средство, чем материал в объеме стеклянного изделия 100, который не
- 15 находится в пределах поврежденной трещиной зоны 104.

[0039] Согласно вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, изменчивость распределения прочности в стеклянном изделии 100 вследствие присутствия группы дефектов уменьшается или устраняется, и надежность стеклянного изделия 100 повышается посредством селективного удаление материала на протяжении 20 глубины каждого дефекта в группе и, в частности, посредством селективного удаления материала на протяжении максимальной начальной глубины дефекта A_i (т. е. посредством селективного удаления стеклянного материала из поврежденной трещиной зоны) при одновременном сокращении до минимума удаления материала с первой поверхности 106 стеклянного изделия 100. В результате этого верхушка 110 дефекта 102 расширяется или «затупляется» посредством увеличения радиуса кривизны у верхушки 110, и в результате этого уменьшаются начальный коэффициент концентрации напряжений K_t и предрасположенность дефекта 102 к распространению в направлении 25 толщины стеклянного материала. Однако после селективного удаления материала на протяжении максимальной начальной глубины дефекта A_i , по меньшей мере, часть группы дефектов остается в стеклянном изделии. Более конкретно, по меньшей мере, те дефекты, которые имеют максимальную начальную глубину дефекта A_i , по-прежнему присутствуют в стеклянном изделии следующий удаление стеклянного материала.

[0040] Согласно вариантам осуществления, где стеклянное изделие включает изогнутые поверхности, как описывается в настоящем документе, селективное удаление материала на протяжении глубины дефектов в группе дефектов увеличивает предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия по сравнению с бездефектным стеклянным изделием. То есть селективное удаление материала на протяжении глубины дефектов в группе дефектов увеличивает предел прочности при одноосном сжатии 30 таким образом, что предел прочности при одноосном сжатии приближается к пределу прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия. Например, согласно вариантам осуществления, селективное удаление материала на протяжении глубины дефектов в группе дефектов увеличивает предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия до уровня, составляющего более чем или равного 90% 40 предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия. Согласно некоторым вариантам осуществления, селективное удаление материала на протяжении глубины дефектов в группе дефектов увеличивает предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия до уровня, составляющего более чем или равного 92%

предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия или даже составляющего более чем или равного 95% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, селективное удаление материала на протяжении глубины дефектов в 5 группе дефектов увеличивает предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия до уровня, составляющего более чем или равного 98% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия.

[0041] Согласно некоторым вариантам осуществления, стеклянный материал селективно удаляется на протяжении максимальной начальной глубины дефекта A_i для 10 дефекта 102 посредством химической обработки. Согласно вариантам осуществления, химическая обработка может включать введение в контакт стеклянного изделия 100 с травильным раствором. Согласно вариантам осуществления, стеклянное изделие может подвергаться химической обработке посредством одновременного введения травильного раствора в контакт с первой поверхностью 106 и второй поверхностью 108 стеклянного 15 изделия 100, например, когда стеклянное изделие полностью погружается в ванну с травильным раствором. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, травильный раствор вводится в контакт только с первой поверхностью 106 стеклянного изделия 100. Например, согласно вариантам осуществления, где стеклянное изделие 100 представляет собой стеклянный контейнер, в котором первая поверхность 106 20 представляет собой наружную поверхность стеклянного контейнера, и один из торцов стеклянного контейнера является закрытым, например, когда стеклянный контейнер представляет собой стеклянный флакон, стеклянное изделие может погружаться в ванну с травильным раствором таким образом, что с травильным раствором вступает в контакт только наружная поверхность стеклянного контейнера, но не внутренняя 25 поверхность (т. е. вторая поверхность 108) стеклянного контейнера.

[0042] Согласно некоторым вариантам осуществления, каждый дефект 102 в группе дефектов может закрываться перед химической обработкой. То есть дефекты в стеклянном контейнере могут возникать в результате имеющего упругое происхождение 30 фрикционного повреждения, которое после введения повреждения заставляет дефекты закрываться таким образом, что поверхности разлома на каждой стороне дефекта находятся в контакте друг с другом на протяжении глубины каждого дефекта. В этом сценарии, когда химическая обработка включает введение в контакт первой поверхности стеклянного изделия с травильным раствором, этот травильный раствор может оказаться 35 неспособным проникать в дефект; вместо этого селективное удаление материала из пределов поврежденной трещиной зоны 104 вследствие контакта с травильным раствором происходит от первой поверхности 106 стеклянного изделия до верхушки 110 дефекта 102 (т. е. от поверхности стеклянного изделия до внутреннего пространства стеклянного изделия) без соответствующего удаления стеклянного материала до такой же глубины от первой поверхности 106 стеклянного изделия в областях за пределами 40 поврежденной трещиной зоны 104. Это поведение, которое наблюдалось экспериментально, подтверждает гипотезу о том, что стеклянный материал в поврежденной трещиной зоне 104 является подверженным растворению в большей степени, чем стеклянный материал в объеме стеклянного изделия за пределами поврежденной трещиной зоны 104.

[0043] Согласно вариантам осуществления, химическая обработка осуществляется посредством введения в контакт, по меньшей мере, первой поверхности стеклянного изделия с травильный раствором при такой концентрации, в течение такого времени и при такой температуре, которые являются достаточными для селективного удаления

материала на протяжении максимальной начальной глубины дефекта A_i в поврежденной трещиной зоне 104 при удалении меньшего или равного количества материала (по меньшей мере, в отношении глубины) с первой поверхности 106 и/или второй поверхности 108 стеклянного изделия. То есть нанесение травильного раствора, по меньшей мере, на первую поверхность 106 и условия, в которых наносится травильный раствор, не приводят к удалению стеклянного материала с первой поверхности 106 стеклянного изделия до глубины, соответствующей максимальной начальной глубине дефекта A_i , таким образом, что вся группа дефектов удаляется с первой поверхности 106 стеклянного изделия; вместо этого нанесение травильного раствора, по меньшей мере, на первую поверхность 106 и условия, в которых наносится травильный раствор, являются достаточными для удаления материала в пределах поврежденной трещиной зоны 104, окружающей дефект, при минимальном удалении материала с первой поверхности 106 и второй поверхности 108 стеклянного изделия. Это производит эффект сохранения, по меньшей мере, части из группы дефектов на первой поверхности 106 стеклянного изделия 100, даже несмотря на изменение морфологии после химической обработки.

[0044] Согласно вариантам осуществления, по меньшей мере, первая поверхность стеклянного изделия подвергается травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 25% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия. Например, согласно некоторым вариантам осуществления, первая поверхность стеклянного изделия может подвергаться травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 20% или даже составляющей менее чем или равной приблизительно 15% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия. Согласно некоторым вариантам осуществления, стеклянное изделие подвергается травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 25% и составляющей более чем или равной приблизительно 5% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, стеклянное изделие может подвергаться травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 20% и составляющей более чем или равной приблизительно 5% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, стеклянное изделие подвергается травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 25% и составляющей более чем или равной приблизительно 10% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, стеклянное изделие может подвергаться травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 20% и составляющей более чем или равной приблизительно 10% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия.

Согласно другим вариантам осуществления, стеклянное изделие подвергается травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 15% и составляющей более чем или равной приблизительно 10% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на первой поверхности стеклянного изделия.

⁵ [0045] Согласно вариантам осуществления, травильный раствор включает смесь фтористоводородной кислоты, имеющей первую молярность и, по меньшей мере, одной минеральной кислоты, имеющей вторую, отличающуюся от первой, молярность.

Молярность фтористоводородной кислоты и молярность одной или нескольких минеральных кислот выбираются таким образом, чтобы выполнялось предварительно определенное соотношение, способствующее равномерному травлению стеклянного изделия. В частности, фтористоводородная кислота включается в травильный раствор, чтобы ускорять растворение SiO_2 из стеклянной структуры. Одна или несколько

¹⁰ минеральных кислот включаются в смесь и, в частности, выбираются таким образом, чтобы ускорять растворение других составляющих компонентов стеклянной структуры.

¹⁵ Например, для стекол, содержащих в высоких концентрациях MgO и/или CaO , хлористоводородная кислота может использоваться для растворения этих компонентов стеклянной структуры. Однако было обнаружено также, что различные скорости растворения под действием фтористоводородной и одной или нескольких минеральных кислот могут приводить к неравномерному удалению материала из стеклянного изделия.

²⁰ [0046] В частности, было обнаружено, что когда молярность, по меньшей мере, одной минеральной кислоты составляет менее чем трехкратная молярность фтористоводородной кислоты, минеральная кислота и составляющие компоненты стекла, растворяющиеся в минеральной кислоте, образуют гелевый слой (т. е. происходит гелеобразование), который покрывает поверхность стеклянного изделия и замедляет

²⁵ и/или ингибирует дальнейшее растворение материала из стеклянного изделия, и в результате этого осуществляется неравномерное удаление материала с поверхности стеклянного изделия. В тех ситуациях, где стеклянное изделие подвергается травлению для предотвращения разрушения от дефектов, как описано в настоящем документе, гелевый слой может предотвращать модификацию морфологии верхушки трещины,

³⁰ что, в свою очередь, может приводить к повышению коэффициента концентрации напряжений на верхушке трещины и усиливать предрасположенность к разрушению от дефекта. Например, когда стеклянное изделие подвергается травлению для удаления дефектов с поверхности стеклянного изделия, гелевый слой, образующийся в результате

³⁵ низкой молярности минеральной кислоты в травильном растворе (то есть низкой молярности по отношению к молярности фтористоводородной кислоты), может накапливаться вблизи верхушки дефекта, эффективно закрывая верхушку и предотвращая последующую модификацию морфологии верхушки трещины.

[0047] Однако было определено, что когда молярность одной или нескольких минеральных кислот в травильном растворе составляет более чем или равняется ⁴⁰ приблизительно трехкратной молярности фтористоводородной кислоты в травильном растворе и составляет менее чем или равняется приблизительно шестикратной молярности фтористоводородной кислоты в травильном растворе, травильный раствор не образует гелевый слой на поверхности (или внутри дефектов) стеклянного изделия, и, по существу, стеклянный материал удаляется с поверхности стеклянного изделия (и изнутри дефектов) с по существу равномерной скоростью. Соответственно, согласно

⁴⁵ вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, молярность одной или нескольких минеральных кислот составляет более чем или равняется трехкратной и составляет менее чем или равняется шестикратной молярности фтористоводородной

кислоты. То есть вторая молярность составляет более чем или равняется трехкратной и составляет менее чем или равняется шестикратной первой молярности.

[0048] Согласно вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, молярность фтористоводородной кислоты (т. е. первая молярность) составляет более 5 чем или равняется 0,5 М и составляет менее чем или равняется приблизительно 3,0 М, и молярность минеральной кислоты (т. е. вторая молярность) составляет от приблизительно трехкратной до приблизительно шестикратной первой молярности для достижения равномерного растворения и удаления материала с первой поверхности стеклянного изделия и вблизи дефектов в стеклянном изделии.

[0049] Согласно вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, минеральная кислота включает, по меньшей мере, одну минеральную кислоту, которая не представляет собой фтористоводородную кислоту. Например, минеральная кислота может включать, по меньшей мере, одну из хлористоводородной кислоты, азотной кислоты, фосфорной кислоты, серной кислоты, борной кислоты, бромистоводородной 15 кислоты и хлорной кислоты. Согласно вариантам осуществления, минеральная кислота может включать более чем одну минеральную кислоту. Например, сочетание минеральных кислот может использоваться для осуществления равномерного растворения и удаления е составляющих компонентов разнообразных стекол в зависимости от химического состава стекла, которое подвергается травлению.

[0050] Согласно вариантам осуществления, описанным в настоящем документе, травильный раствор является подходящим, чтобы равномерно растворять и удалять материал с первой поверхности стеклянного изделия со скоростью, составляющей менее 20 чем 10% массы стеклянного изделия в течение продолжительности обработки, составляющей более чем или равной приблизительно 90 минут и составляющей менее чем или равной приблизительно 360 минут. Эта относительно низкая скорость удаления материала повышает равномерность удаления материала и при этом сокращает до минимума суммарное количество удаляемого материала и уменьшает коэффициент концентрации напряжений на верхушке каждого дефекта в группе дефектов, присутствующих в стеклянном изделии.

[0051] Согласно одному варианту осуществления, травильный раствор, используемый для химической обработки, может включать смесь одномолярной (1 М) фтористоводородной кислотой с четырехмолярной (4 М) хлористоводородной кислотой в воде. Например, согласно одному варианту осуществления, травильный раствор может включать раствор 3,4 об.% 1 М HF, 33,3 об.% 4 М HCl, причем остаток 35 представляет собой воду (например, раствор 136 мл 1 М HF, 1332 мл 4 М HCl и 2532 мл H₂O).

[0052] Согласно вариантам осуществления, травильный раствор и стеклянное изделие находятся при температуре окружающей среды (например, при температуре 25°C), когда они вводятся в контакт друг с другом. Однако температура травильного раствора 40 может изменяться (т. е. увеличиваться или уменьшаться) для регулирования скорости, с которой стеклянный материал удаляется из стеклянного изделия.

[0053] Согласно вариантам осуществления, стеклянное изделие может находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей менее чем или равной 360 минутам. Согласно некоторым вариантам осуществления, стеклянное изделие может находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей менее чем или равной 270 минутам, или даже составляющей менее чем или равной 180 минутам. Согласно некоторым другим вариантам осуществления стеклянное изделие может 45

находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей менее чем или равной 90 минутам или даже составляющей менее чем или равной 60 минутам. Согласно некоторым вариантам осуществления, стеклянное изделие может находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей более чем или равной 60 минутам или даже составляющей 90 минут и составляющей менее чем или равной 360 минутам. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, стеклянное изделие может находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей более чем или равной 60 минутам или даже составляющей 90 минут и составляющей менее чем или равной 270 минутам. Согласно некоторым другим вариантам осуществления, стеклянное изделие может находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей более чем или равной 60 минутам или даже составляющей 90 минут и составляющей менее чем или равной 180 минутам. Согласно другим вариантам осуществления, стеклянное изделие может находиться в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей более чем или равной 60 минутам и составляющей менее чем или равной 90 минутам.

[0054] Согласно одному конкретному варианту осуществления, где травильный раствор представляет собой смесь 3,4 об.% 1 М HF и 33,3 об.% 4 М HCl в воде при температуре 25°C, стеклянное изделие находится в контакте с травильным раствором в течение продолжительности обработки, которая составляет более чем или равняется 90 минут, чтобы ускорялось удаление материала в поврежденной трещиной зоне 104. Согласно данному варианту осуществления, продолжительность обработки может составлять менее чем или равняться 360 минутам. То есть продолжительность обработки может составлять от приблизительно 90 минут до приблизительно 360 минут. Однако следует понимать, что продолжительность обработки может изменяться в зависимости от конкретного травильного раствора, температуры травильного раствора и состава стекла стеклянного изделия. Следует также понимать, что продолжительность обработки может изменяться в зависимости от максимальной начальной глубины дефекта A_i в группе дефектов в составе стеклянного изделия. То есть для группы дефектов, которые имеют большую максимальную начальную глубину дефекта A_i , может потребоваться более продолжительное время травления для завершения селективного удаления материала от поверхности до верхушки трещины.

[0055] Далее рассмотрим фиг. 5 и 6В, где после селективного удаления стеклянного материала на протяжении начальной максимальной глубины дефекта A_i в поврежденной трещиной зоне 104, стеклянное изделие 100 все же включает, по меньшей мере, часть дефектов, присутствующих в начальной группе дефектов, включая, по меньшей мере, те дефекты, которые имели максимальную начальную глубину дефекта A_i . То есть согласно вариантам осуществления, где стеклянный материал удаляется на протяжении глубины дефекта посредством травление, обработка посредством травления не является достаточно агрессивной, чтобы полностью удалять материал с первой поверхности 106 стеклянного изделия 100 до глубины, составляющей более чем начальная максимальная глубина дефекта A_i . Следующий обработка посредством травления, после обработки толщина стеклянного изделия может составлять T_{pp} . Согласно вариантам осуществления, после обработки толщина T_{pp} составляет менее чем или равняется начальной толщине T_i . Согласно некоторым вариантам осуществления,

обработка посредством травления выбирается, чтобы сократить до минимума удаление материала с первой поверхности 106 стеклянного изделия 100 таким образом, что после обработки толщина T_{pp} в максимально возможной степени приближается к начальной толщине T_i . То есть сокращается до минимума изменение толщины $\Delta T = (T_i - T_{pp})$.

[0056] Как отмечается выше, материал в поврежденной трещиной зоне 104 может быть в большей степени подверженным растворению при воздействии травильного раствора, чем стеклянный материал в объеме стеклянного изделия 100, включая стеклянный материал на первой поверхности 106 стеклянного изделия. После обработки посредством травления каждый дефект 102 в группе дефектов имеет глубину, которая составляет менее чем или равняется максимальной глубине дефекта A_{pp} после обработки, которая измеряется от обработанной первой поверхности 106_{pp} стеклянного изделия до верхушки 110 дефекта 102. Согласно некоторым вариантам осуществления, которые описываются в настоящем документе, после обработки максимальная глубина дефекта A_{pp} составляет более чем или по существу равняется максимальной начальной глубине дефекта A_i . То есть согласно некоторым вариантам осуществления, максимальная начальная глубина дефекта A_i может фактически увеличиваться в результате химической обработки. Не желая ограничиваться теорией, авторы считают, что это увеличение может происходить вследствие разности растворимости стеклянного материала в поврежденной трещиной зоне 104 (фиг. 4), включающей материал, окружающий верхушку 110 дефекта 102, и растворимости стеклянного материала в объеме стеклянного изделия 100 и, в частности, растворимости стеклянного материала на первой поверхности 106 стеклянного изделия 100. Таким образом, разность ΔA между максимальной глубиной дефекта A_{pp} после обработки и максимальной начальной глубиной дефекта A_i может составлять более чем или по существу равняться изменению толщины ΔT . То есть $(T_{pp} - T_i) \leq (A_{pp} - A_i)$.

[0057] Кроме того, химическая обработка увеличивает ширину дефекта 102, а также радиус кривизны дефекта 102 у верхушки 110. То есть после химической обработки каждый дефект 102, оставшийся в группе дефектов, имеет после травления ширину $2d_{pp}$, которая составляет более чем начальная ширина $2d_i$. Аналогичным образом, после обработки радиус r_{pp} верхушки 110 каждого дефекта 102, который остается в группе дефектов после химической обработки, составляет более чем начальный радиус r_i дефекта 102. То есть d_{pp}^2/A_{pp} составляет более чем d_i^2/A_i .

[0058] Как отмечается выше, коэффициент концентрации напряжений K_t дефекта обратно пропорционален радиусу дефекта у его верхушки. Таким образом, увеличение радиуса дефекта 102 у верхушки 110 посредством химической обработки уменьшает коэффициент концентрации напряжений K_t . В частности, после обработки коэффициент концентрации напряжений K_{tp} дефекта 102 после химической обработки, например, после осуществления обработки посредством травления, составляет менее чем начальный коэффициент концентрации напряжений K_{ti} дефекта 102 перед химической обработкой (т. е. $K_{tp} < K_{ti}$). Это означает, что после химической обработки любые дефекты, которые остаются в группе дефектов, имеют меньшую предрасположенность к распространению в направлении толщины стеклянного изделия 100 и, в результате этого предотвращается механическое разрушение стеклянного изделия 100, и повышается надежность стеклянного изделия 100.

[0059] Другими словами, перед химической обработкой (например, перед осуществлением обработки посредством травления), стеклянное изделие 100 имеет начальную вероятность разрушения P_i . После химической обработки (например, после осуществления обработки посредством травления) стеклянное изделие имеет вероятность разрушения P_{pp} после обработки, которая составляет менее чем начальная вероятность разрушения P_i , несмотря на то, что, по меньшей мере, часть дефектов в группе дефектов остаются в стеклянном изделии 100 после осуществления обработки посредством травления, такие как дефекты, которые исходно имели максимальную начальную глубину дефекта A_i , и максимальная начальная глубина дефекта A_i увеличивается до A_{pp} . Это уменьшение вероятности разрушения после химической обработки обусловлено, по меньшей мере, частично, изменением морфологии дефекта 102 на протяжении его глубины и у верхушки 110 дефекта 102.

[0060] Согласно вариантам осуществления, после того, как стеклянное изделие подвергается химической обработке посредством воздействия травильного раствора таким образом, что стеклянное изделие подвергается травлению до глубины, составляющей менее чем или равной 25% максимальной начальной глубины дефекта A_i , предел прочности при одноосном сжатии химически обработанного стеклянного изделия является по существу таким же, как предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия, подвергнутого травлению до максимальной начальной глубины дефекта A_i в таких же условиях одноосной сжимающей нагрузки.

[0061] Как отмечается выше, ширина $2d_{pp}$ дефекта 102 увеличивается в результате химической обработки, воздействуя на поверхности разлома дефекта, причем данные поверхности теперь становятся приблизительно параллельными по отношению друг к другу. Не желая ограничиваться теорией, авторы считают, что увеличение ширины дефекта 102 позволяет другим используемым для обработки текучим средам проникать в глубину дефекта 102 до верхушки 110. Например, стеклянное изделие 100 может подвергаться ионообменной обработке в ванне с расплавленной солью после химической обработки в целях введения слоя напряжения сжатия, по меньшей мере, на первую поверхность 106_{pp} стеклянного изделия 100. Не желая ограничиваться теорией, авторы считают, что увеличение ширины дефекта после химической обработки может позволять проникновению расплавленной соли в солевую ванну до верхушки 110 дефекта 102 таким образом, что, по меньшей мере, верхушка 110 дефекта 102 находится в состоянии сжатия, что дополнительно улучшает прочность стеклянного изделия 100 с существующей группой дефектов. Это может также обеспечивать устранение дефектов, которые в обычных условиях проникали бы далее глубины слоя сжатия, полученного посредством ионообменной обработки, поскольку верхушки таких дефектов находятся в состоянии сжатия.

[0062] Способы, описанные в настоящем документе, могут использоваться для уменьшения изменчивости распределения Вейбулла для прочности в группе стеклянных изделий, предотвращения вероятности механического разрушения стеклянных изделий в аналогичных условиях нагрузки и повышения надежности стеклянных изделий в течение их срока службы. То есть уменьшение изменчивости распределения Вейбулла для прочности в группе стеклянных изделий с использованием способов, описанных в настоящем документе, может увеличивать конечную надежность стеклянных изделий, поскольку стеклянные изделия подвергаются случайно прилагаемой нагрузке, действующей в течение их заданного срока службы.

[0063] В частности, способы, описанные в настоящем документе, увеличивают нижний предел распределения Вейбулла для прочности до более близкого подхода к верхнему пределу распределения Вейбулла для прочности посредством уменьшения коэффициента концентрации напряжений у верхушки дефектов в группе дефектов без удаления всех 5 дефектов в группе дефектов. По существу, изменчивость распределения Вейбулла для прочности уменьшается в группе стеклянных контейнеров, что, в свою очередь, обеспечивает повышение величины увеличение допустимой прилагаемой нагрузки, воздействующей в течение срока службы стеклянных контейнеров. Другими словами, посредством уменьшения предрасположенности к разрушению от снижающих прочность 10 отклонений (например, тех дефектов, которые имеют максимальную начальную глубину дефекта A_i), надежность группы стеклянных изделий увеличивается посредством предотвращения разрушения стеклянных изделий под действием известных прилагаемых нагрузок. Этот подход к предотвращению повреждений может регулироваться, чтобы 15 обеспечивать сверхвысокую надежность стеклянных изделий посредством устранения известных корневых причин режимов разрушения.

[0064] В рамках статистики Вейбулла это увеличение надежности группы стеклянных изделий посредством уменьшения изменчивости распределения Вейбулла для прочности (т. е. уменьшения ширины распределение прочности) и повышения величины распределения означает увеличение модуля Вейбулла, а также увеличение 20 характеристической прочности группы стеклянных изделий для известного источника дефектов, причем каждая из этих целей может быть достигнута способами, описанными в настоящем документе, которые эффективно уменьшают коэффициент концентрации напряжений на верхушке дефекта и увеличивают прочность стеклянного изделия. С использованием способов, описанных в настоящем документе, те дефекты, которые 25 имеют максимальную начальную глубину дефекта A_i , модифицируются и приобретают уменьшенный коэффициент концентрации напряжений без удаления дефектов со стеклянного изделия. Уменьшение коэффициента концентрации напряжений эффективно уменьшает величину напряжения, которая требуется для распространения любого 30 данного дефекта, остающегося в стеклянном изделии после обработки, и в результате этого уменьшается изменчивость наблюдаемой прочности.

[0065] Уменьшение вероятности разрушения после химической обработки может приравниваться к вероятности разрушения бездефектного стеклянного корпуса или изделия. В частности, распределение Вейбулла для прочности стеклянного корпуса или изделия после химической обработки может сопоставляться с теоретическим 35 распределением Вейбулла для прочности бездефектного стеклянного корпуса или изделия. Теоретическое распределение Вейбулла для прочности бездефектного стеклянного изделия может быть вычислено для данных условий нагрузки (такой как одноосная сжимающая нагрузка, которая описывается в настоящем документе) с использованием механики разрушения. Согласно вариантам осуществления, описанным 40 в настоящем документе, фактическое распределение Вейбулла для прочности стеклянного изделия после химической обработки и под одноосной сжимающей нагрузкой находится в пределах 10% теоретического распределения Вейбулла для прочности бездефектного стеклянного изделия в таких же условиях нагрузки. То есть 45 если бездефектное стеклянное изделие имеет теоретическое распределение Вейбулла для прочности X в условиях прилагаемой одноосной сжимающей нагрузки, химически обработанное стеклянное изделие будет иметь фактическое распределение Вейбулла для прочности, которое составляет более чем или равняется 90% теоретического распределения Вейбулла для прочности бездефектного стеклянного изделия в таких

же условиях нагрузки. Согласно некоторым вариантам осуществления, которые описываются в настоящем документе, фактическое распределение Вейбулла для прочности стеклянного изделия после химической обработки и под одноосной сжимающей нагрузкой находится в пределах 5% теоретического распределения Вейбулла для прочности бездефектного стеклянного изделия в таких же условиях нагрузки.

5 Согласно некоторым другим вариантам осуществления, фактическое распределение Вейбулла для прочности стеклянного изделия после химической обработки и под одноосной сжимающей нагрузкой находится в пределах 2% теоретического распределения Вейбулла для прочности бездефектного стеклянного изделия в таких

10 же условиях нагрузки.

Примеры

[0066] Варианты осуществления, описанные в настоящем документе, будут дополнительно разъясняться посредством следующего примера.

Пример 1

15 [0067] Чтобы продемонстрировать увеличение надежности стеклянных изделий, обработанных согласно способам, описанным в настоящем документе, в лабораторном масштабе был поставлен эксперимент для сравнения распределения разрушающей нагрузки в группе необработанных стеклянных изделий с распределениями разрушающей нагрузки в группах стеклянных изделий, обработанных согласно

20 способам, описанным в настоящем документе.

[0068] Шесть групп стеклянных изделий первоначально подвергали повреждению посредством упругого фрикционного контакта в идентичных условиях, чтобы эффективно устранять существующую историю повреждений для каждой группы.

Стеклянные изделия представляли собой стеклянные флаконы круглой формы, имеющие 25 объем 3 мл. Повреждение, производимое посредством упругого фрикционного контакта, по существу, представляет собой нанесение повреждения в том месте, где величина локализованного напряжения превышает поверхностную прочность стеклянного изделия, и создается глубокий дефект, превышающий 100 мкм. В частности, каждую группу стеклянных изделий подвергали фрикционному контакту стекла по стеклу с 30 использованием устройства для испытания флаконов, описанного в параграфах [00140] -[00142] и представленного на фиг. 1 находящейся на рассмотрении патентной заявки США № 13/780740, поданной 28 февраля 2013 г. и озаглавленной «Стеклянные изделия с антифрикционными покрытиями», чтобы индуцировать повреждение на поверхности стеклянного изделия. Фрикционное повреждение, нанесенное каждой группе, 35 производилось при прилагаемой нагрузке 6 Н.

[0069] После нанесения повреждению посредством упругого фрикционного контакта первую группу стеклянных изделий отделяли от остальных групп и не подвергали какой-либо дополнительной обработки, т. е. она представляла собой группу «без обработки». Остальные группы подвергали химической обработке, в ходе которой 40 каждую группу помещали в ванну, в которой циркулировала смесь, содержащая 3,4 об.% 1 М HF и 33,3 об.% 4 М HCl в воде. Температура ванны составляла 25°C. Вторая группа стеклянных изделий выдерживалась в ванне в течение 22,4 минут; третья группа стеклянных изделий выдерживалась в ванне в течение 45 минут; четвертая группа выдерживалась в ванне в течение 90 минут; пятая группа стеклянных изделий 45 выдерживалась в ванне в течение 180 минут; и шестая группа стеклянных изделий выдерживалась в ванне в течение 360 минут. Каждый стеклянное изделие взвешивали до воздействия травильного раствора. После извлечения из ванны каждую группу промывали и высушивали, и каждое стеклянное изделие в каждой группе повторно

взвешивали, таким образом, чтобы потерю массы вследствие воздействия травильного раствора можно было определять на основании массы до и после травления.

Приведенная ниже таблица 1 представляет заданную продолжительность травления, фактическую продолжительность травления, среднюю потерю массы и вычисленную

5 глубину удаления для каждой из групп. Фиг. 7 графически иллюстрирует среднюю потерю массы (ось у) как функцию продолжительности травления (ось x) для групп 2-6. Как можно видеть на фиг. 7, когда используется сочетание 1 M HF и 4 M HCl (т. е. травильный раствор, в котором молярность минеральной кислоты составляет от трехкратной до шестикратной молярности фтористоводородной кислоты), в результате 10 получается равномерное удаление стеклянного материала в зависимости от времени. То есть скорость потери материала не уменьшалась при увеличении времени вследствие гелеобразования в травильном растворе. Следует отметить, что глубина удаления материала с поверхности стеклянного изделия в каждой группе составляла менее чем максимальная начальная глубина дефекта A_i (т. е. менее чем 100 мкм).

15 [0070] Таблица 1. Результаты травления

Интервал продолжительности травления (мин)	Фактическая продолжительность травления (мин)	Средняя потеря массы (г)	Вычисленная глубина удаления (мкм)
0	0	0	0
21,7-22,7	22,4	0,0366	7
20 43,5-45,5	45	0,0662	12
37,0-90,9	90	0,135	25
173,9-131,8	180	0,255	47
347,8-353,6	360	0,518	96

25 [0071] После этого каждую из групп 1-6 испытывали в условиях одноосного сжатия до разрушения, используя устройство для испытания при горизонтальном сжатии, которое описано в параграфе [00149] находящийся на рассмотрении патентной заявки США № 13/780740, поданной 28 февраля 2013 г. и озаглавленной «Стеклянные изделия с антифрикционными покрытиями». Фиг. 8А и 8В представляют полученные методом СЭМ микрофотографии, иллюстрирующие начало разрушения одного стеклянного 30 изделия из группы «без обработки». Фиг. 9А-11В представляют полученные методом СЭМ микрофотографии, иллюстрирующие модифицированный дефект морфологии стеклянных изделий из групп, подвергнутых химической обработке. В каждом случае обработка посредством травления приводила к закруглению верхушки дефекта, что считалось улучшением способности выдерживать нагрузку стеклянного изделия.

35 [0072] Нагрузка при разрушении для каждого стеклянного изделия в каждой группе графически представлена на фиг. 12. Как представлено на фиг. 12, группы стеклянных изделий, обработанные в травильном растворе в течение 22,4 минут и 45 минут, имели наблюданное увеличение разрушающей нагрузки по сравнению с группой «без обработки», в то время как группы стеклянных изделий, обработанные в травильном 40 растворе в течение 90 минут, 180 минут и 360 минут, проявляли более выраженное увеличение разрушающей нагрузки по сравнению с группой «без обработки».

Приведенная ниже таблица 2 представляет улучшение распределения разрушающей нагрузки (%) по сравнению с группой «без обработки» для каждой группы стеклянных изделий, подвергнутых обработке посредством травления.

45 [0073] Таблица 2. Улучшение распределения разрушающей нагрузки

Продолжительность обработки (мин)	Улучшение распределения разрушающей нагрузки (%)
22,4	74,0896
45	89,6235

90	99,4279
180	99,3101
360	99,6965

[0074] Как представлено на фиг. 12 и в таблице 2, значительное улучшение

5 способности выдерживать нагрузку было достигнуто для тех стеклянных изделий, которые подвергались обработке посредством травления в течение времени, составляющего более чем или равного 90 минутам, по сравнению с группой «без обработки» или даже с группой, подвергавшейся обработке посредством травления в течение 45 минут. В каждом случае улучшение распределения разрушающей нагрузки 10 составляло более чем 99% распределения разрушающей нагрузки для группы «без обработки», демонстрируя, что обработка посредством травления оказывалась эффективной для повышения надежности стеклянных контейнеров в этих группах.

[0075] Следует также отметить, что лишь минимальное улучшение способности выдерживать нагрузку наблюдалось для тех стеклянных изделий, которые подвергались обработке посредством травления в течение более чем 90 минут. Например, фиг. 13 15 графически иллюстрирует процентное разрушение при одноосном сжатии (ось у) как функцию продолжительности травления (ось x). Как представлено на фиг. 13, число разрушений от индуцированного повреждения составляло 100% для группы «без обработки» и группы, обработанной в течение 22,4 минут. Однако для обработки в 20 течение 90 минут или более разрушения в условиях одноосного сжатия возникали снаружи индуцированного повреждения, показывая, что обработка посредством травления оказывалась успешной для предотвращения разрушения от индуцированного повреждения. Эти данные показывают, что прочность стеклянного контейнера может восстанавливаться почти до соответствующего теоретического максимального значения 25 (т. е. до прочности стеклянного контейнера без дефектов) без полного удаления всей группы дефектов, которое осуществляется в традиционной практике. Эти данные действительно демонстрируют, что менее агрессивная химическая обработка, которая удаляет относительно небольшую процентную часть материала может оказываться такой же эффективной в восстановлении прочности стеклянного изделия, как более 30 агрессивная химическая обработка, в ходе которой полностью удаляется группа дефектов.

[0076] Теперь следует понять, что способы, описанные в настоящем документе, являются эффективными для предотвращения механического разрушения в стеклянных изделиях и для повышения надежности стеклянных изделий без удаления всей группы 35 дефектов со стеклянных изделий.

[0077] Для специалистов в данной области техники должно быть очевидным, что могут быть произведены разнообразные модификации и видоизменения вариантов осуществления, описанных в настоящем документе, без отклонения от идеи и выхода за пределы объема заявленного предмета настоящего изобретения. Таким образом, 40 предусматривается, что настоящее описание распространяется на модификации и видоизменения разнообразных вариантов осуществления, описанных в настоящем документе, при том условии, что такие модификации и видоизменения находятся в пределах объема пунктов прилагаемой формулы изобретения и соответствующих эквивалентов.

45

(57) Формула изобретения

1. Стеклянное изделие, включающее:

стеклянный корпус, содержащий наружную поверхность и внутреннюю поверхность,

противоположную по отношению к наружной поверхности, причем каждая из наружной поверхности и внутренней поверхности имеет радиус кривизны;

наружная поверхность стеклянного корпуса содержит группу дефектов, проходящих от наружной поверхности в толщину стеклянного корпуса с максимальной начальной глубиной дефекта A_i , причем

наружная поверхность стеклянного корпуса подвергается травлению до глубины, составляющей менее чем или равной приблизительно 25% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на наружной поверхности;

и

под одноосной сжимающей нагрузкой по меньшей мере часть наружной поверхности находится в состоянии напряжения, и предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия составляет более чем или равняется 90% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия.

2. Стеклянное изделие по п. 1, в котором предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия составляет более чем или равняется 95% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия.

3. Стеклянное изделие по п. 1, в котором предел прочности при одноосном сжатии стеклянного изделия составляет более чем или равняется 98% предела прочности при одноосном сжатии бездефектного стеклянного изделия.

4. Стеклянное изделие по п. 1, в котором вероятность разрушения стеклянного изделия находится в пределах 10% вычисленной вероятности разрушения бездефектного стеклянного изделия.

5. Стеклянное изделие по п. 1, в котором вероятность разрушения стеклянного изделия находится в пределах 5% вычисленной вероятности разрушения бездефектного стеклянного изделия.

6. Стеклянное изделие по п. 1, в котором наружная поверхность стеклянного изделия подвергается травлению до глубины, составляющей более чем или равной приблизительно 5% максимальной начальной глубины дефекта A_i из группы дефектов, присутствующих на наружной поверхности.

7. Способ повышения надежности стеклянных изделий, причем способ содержит:

обеспечение стеклянного изделия, имеющего наружную поверхность, внутреннюю поверхность, противоположную по отношению к наружной поверхности, начальную толщину T_i , проходящую от наружной поверхности до внутренней поверхности, и группу дефектов с максимальной начальной глубиной дефекта A_i , проходящих от наружной поверхности до начальной толщины T_i ;

селективное удаление стеклянного материала с наружной поверхности стеклянного изделия и вблизи каждого дефекта в группе дефектов с одинаковой скоростью посредством химической обработки, по меньшей мере, наружной поверхности стеклянного изделия при такой температуре и в течение такого времени, что после химической обработки

дефекты, имеющие максимальную начальную глубину дефекта A_i , остаются в стеклянном изделии и имеют после обработки коэффициент концентрации напряжений Kt_{pp} на верхушке дефекта, который составляет менее чем начальный коэффициент концентрации напряжений Kt_i на верхушке дефекта перед химической обработкой;

группа дефектов имеет после обработки максимальную глубину дефекта A_{pp} , которая, по существу, равняется A_i ;

после обработки толщина T_{pp} стеклянного изделия составляет менее чем начальная толщина T_i ; и

$|T_{pp} - T_i|$, по существу, равняется $|A_{pp} - A_i|$.

5. Способ по п. 7, в котором каждая из наружной поверхности и внутренней поверхности имеет радиус кривизны.

9. Способ по п. 7, в котором:

стеклянное изделие подвергается химической обработке посредством введения в контакт наружной поверхности стеклянного изделия с травильным раствором, причем 10 данный травильный раствор включает смесь фтористоводородной кислоты, имеющей первую молярность от приблизительно 0,5 М до приблизительно 3,0 М, и по меньшей мере одной минеральной кислоты, имеющей вторую молярность, которая составляет от трехкратной до шестикратной первой молярности; и

15 травильный раствор равномерно удаляет стеклянный материал с наружной поверхности стеклянного изделия и вблизи каждого дефекта в группе дефектов без создания гелевого слоя.

10. Способ по п. 9, в котором по меньшей мере одна минеральная кислота представляет собой по меньшей мере одну из хлористоводородной кислоты, азотной кислоты, фосфорной кислоты, серной кислоты, борной кислоты, бромистоводородной 20 кислоты и хлорной кислоты.

11. Способ по п. 7, в котором стеклянное изделие подвергается химической обработке посредством введения в контакт наружной поверхности стеклянного изделия с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей менее чем или равной 360 минутам.

25 12. Способ по п. 7, в котором стеклянное изделие подвергается химической обработке посредством введения в контакт наружной поверхности стеклянного изделия с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей менее чем или равной 90 минутам.

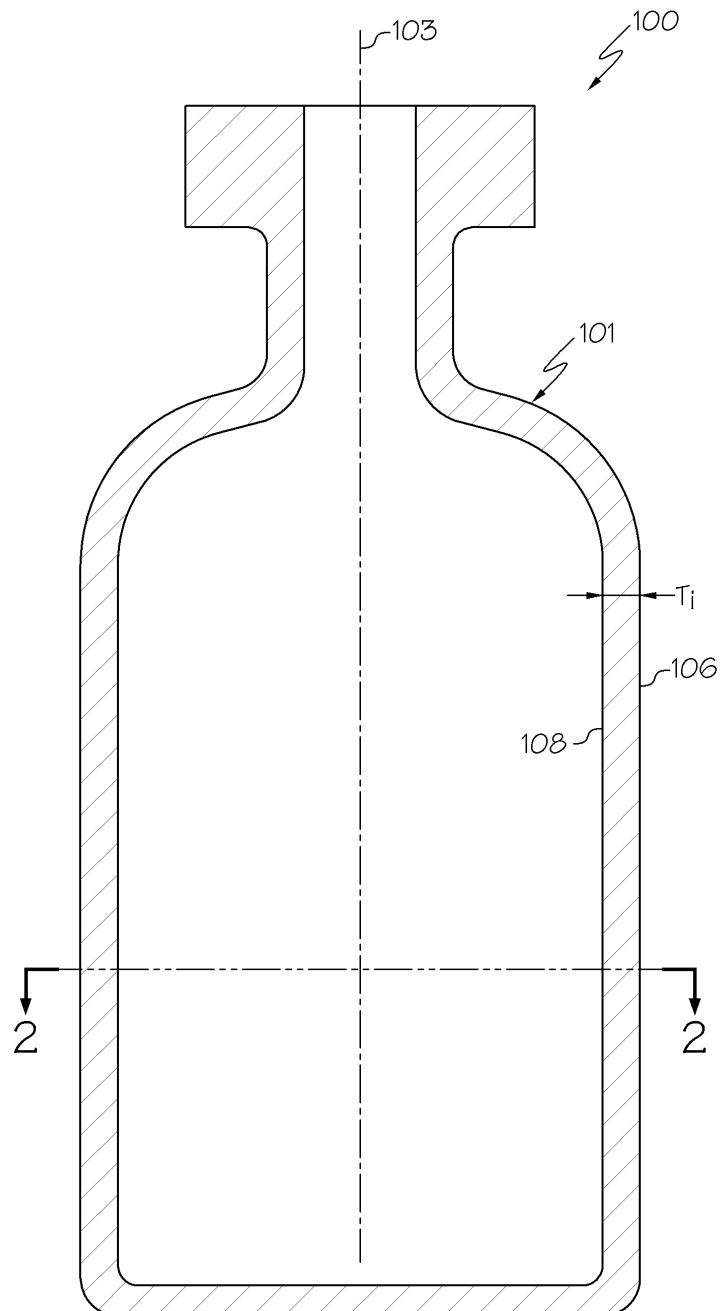
30 13. Способ по п. 7, в котором стеклянное изделие подвергается химической обработке посредством введения в контакт наружной поверхности стеклянного изделия с травильным раствором в течение продолжительности обработки, составляющей более чем или равной 90 минутам и составляющей менее чем или равной 360 минутам.

35 14. Способ по п. 7, в котором стеклянное изделие имеет начальную вероятность разрушения P_i перед химической обработкой и вероятность разрушения P_{pp} после травления после того, как стеклянное изделие подвергается химической обработке, и P_{pp} составляет менее, чем P_i .

40 15. Способ по п. 7, в котором каждый дефект в группе дефектов имеет начальный радиус кривизны r_i на верхушке дефекта перед химической обработкой и радиус кривизны r_{pp} после травления на верхушке дефекта после химической обработки, и $r_i \leq r_{pp}$.

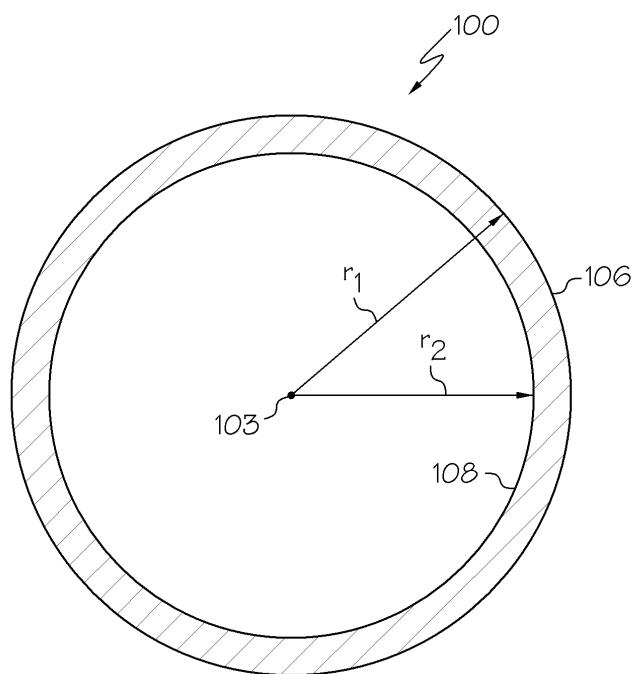
541193

1/12



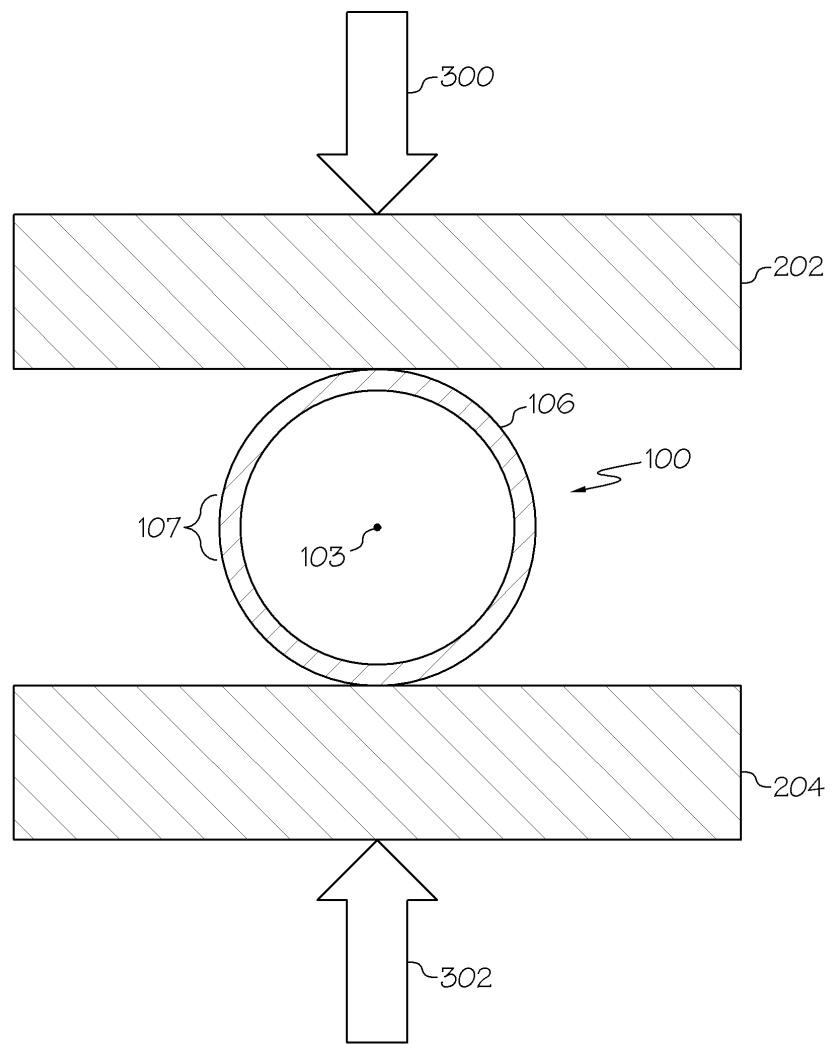
ФИГ. 1

2/12



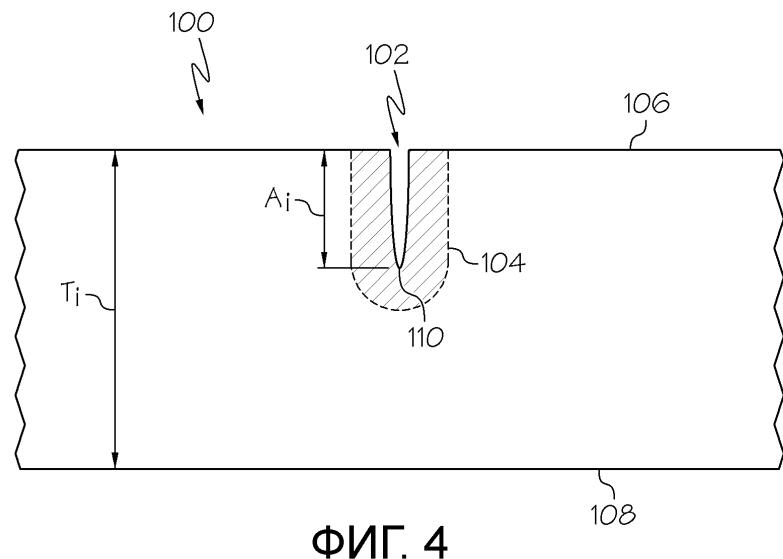
ФИГ. 2

3/12

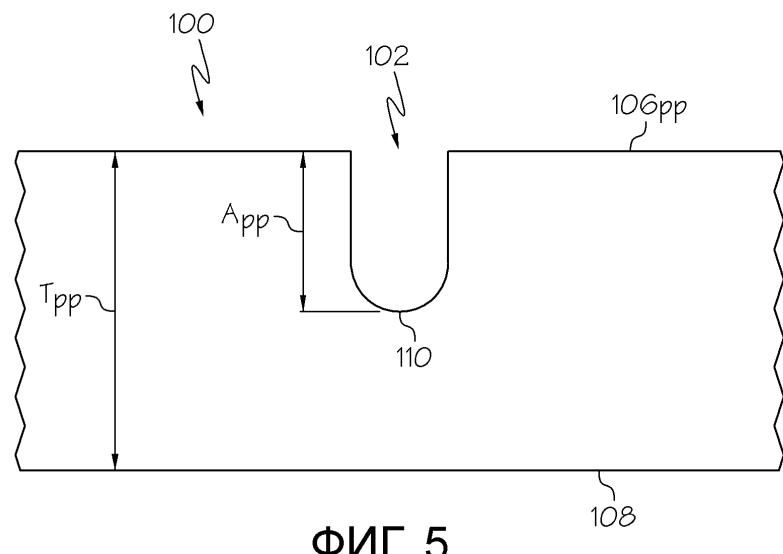


ФИГ. 3

4/12

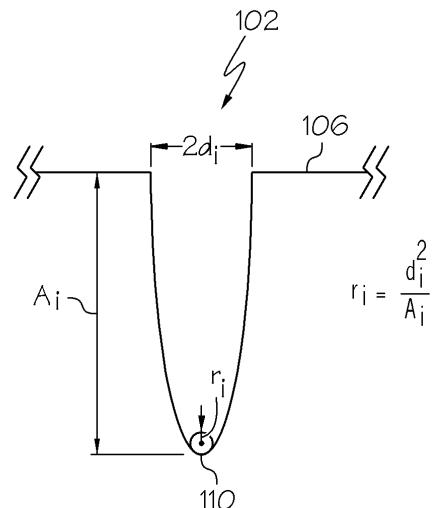


ФИГ. 4

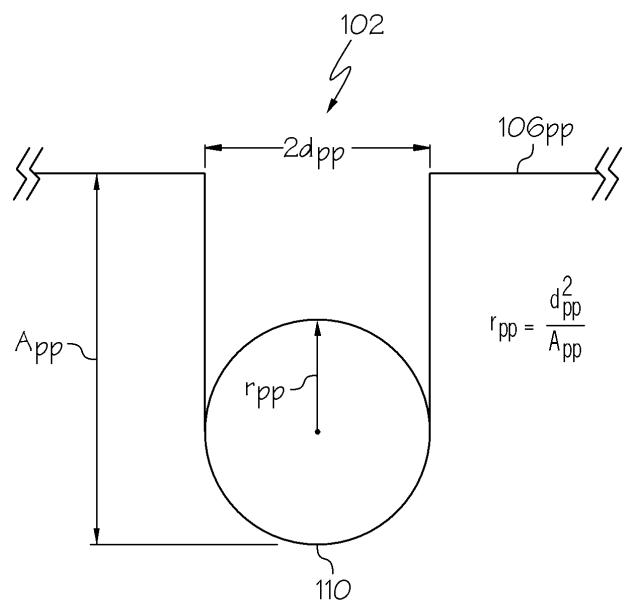


ФИГ. 5

5/12

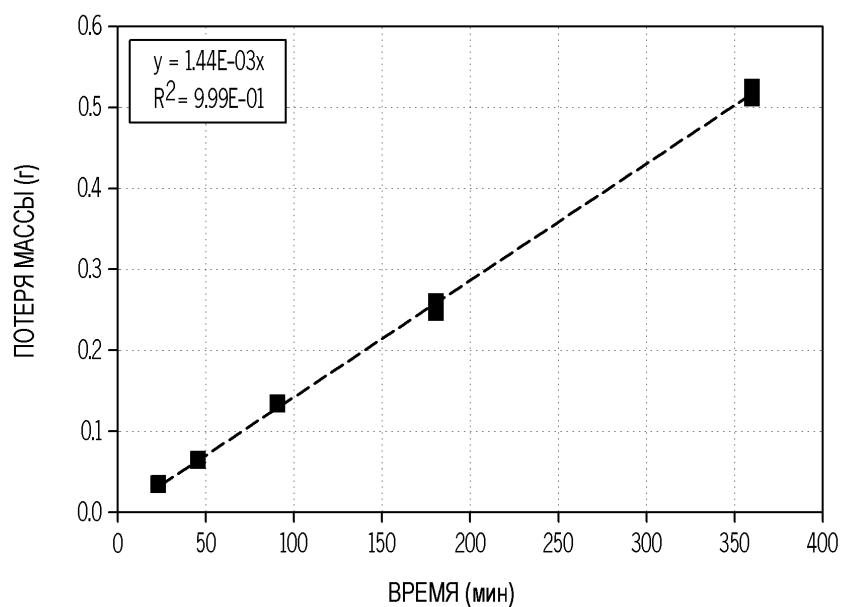


ФИГ. 6А



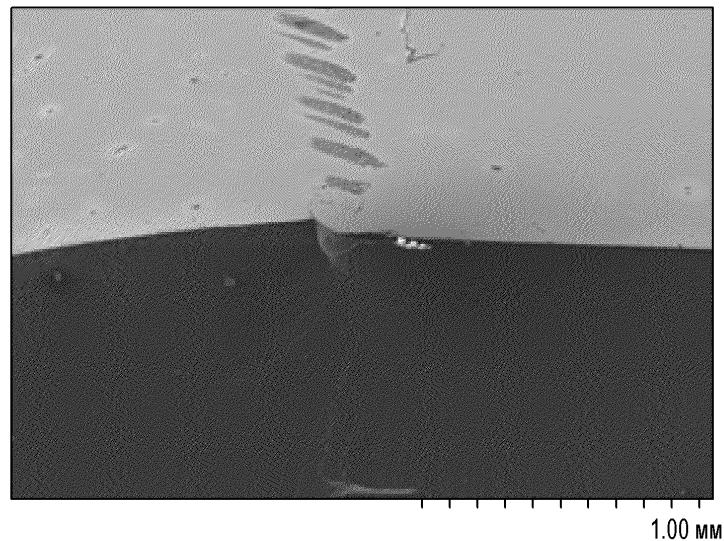
ФИГ. 6В

6/12

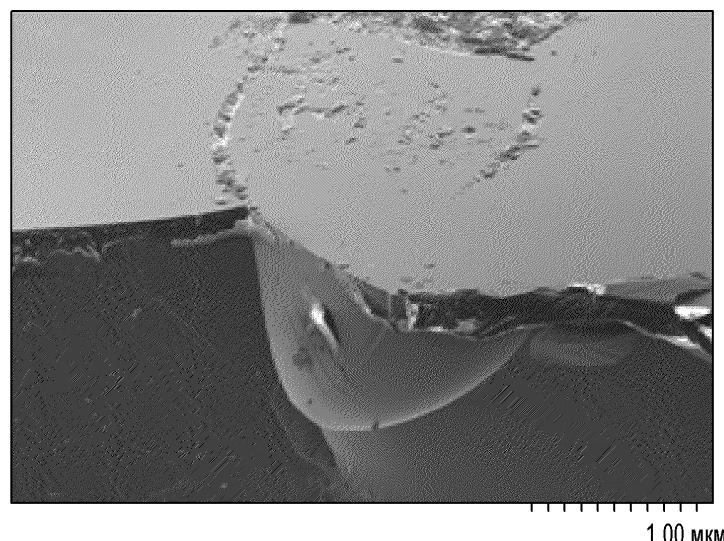


ФИГ. 7

7/12

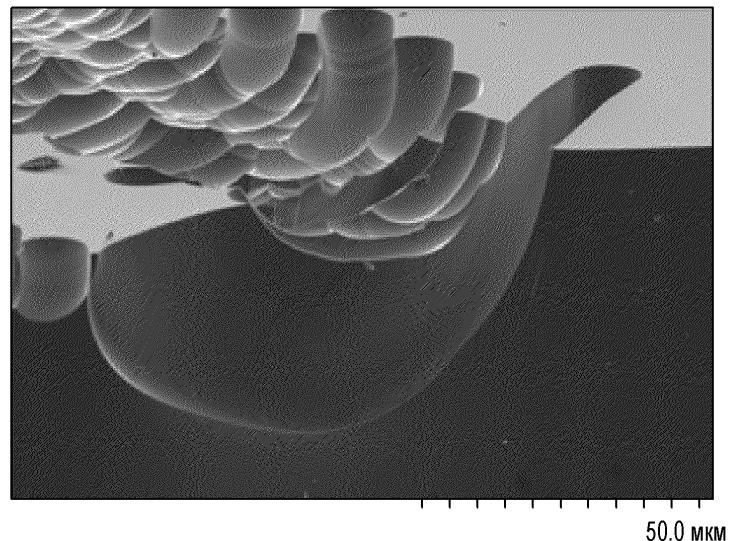


ФИГ. 8А

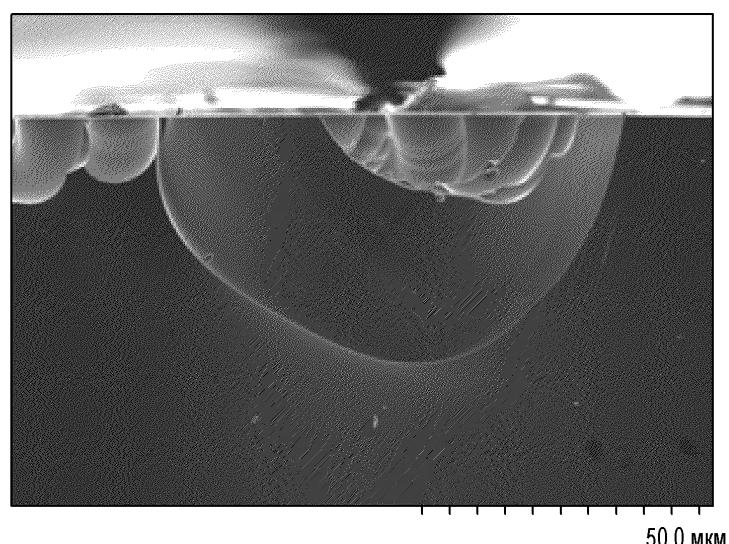


ФИГ. 8В

8/12

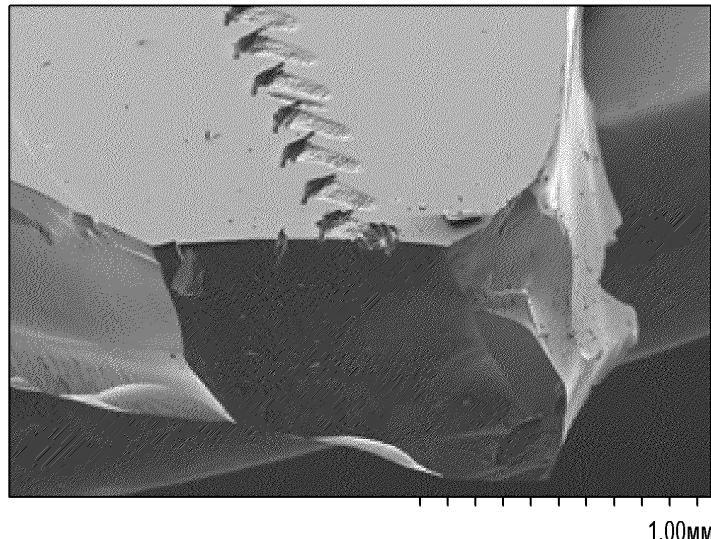


ФИГ. 9А

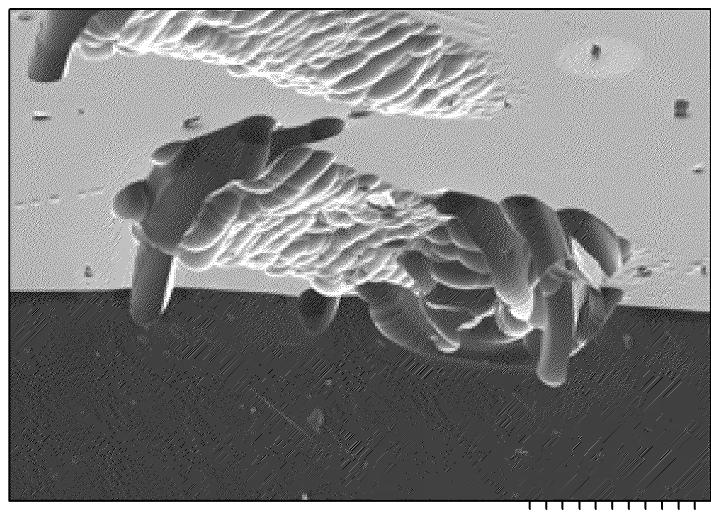


ФИГ. 9В

9/12

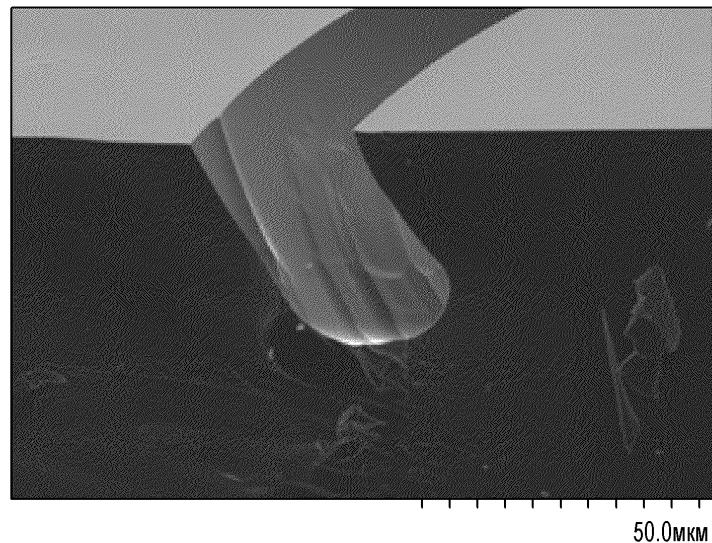


ФИГ. 10А

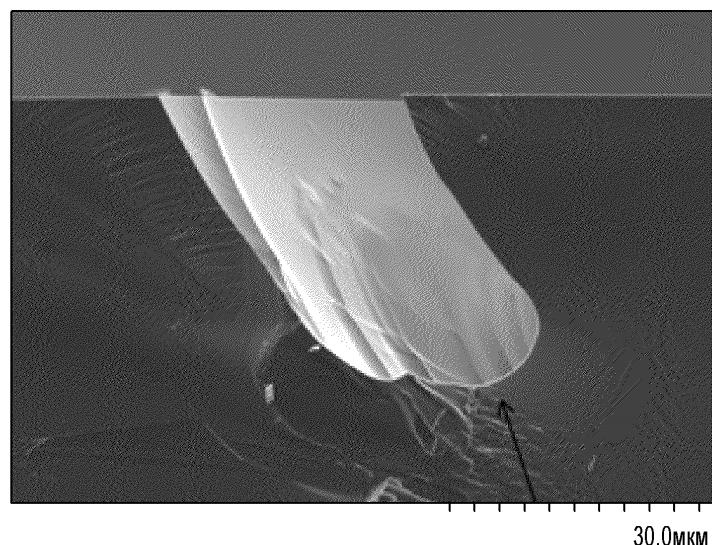


ФИГ. 10В

10/12

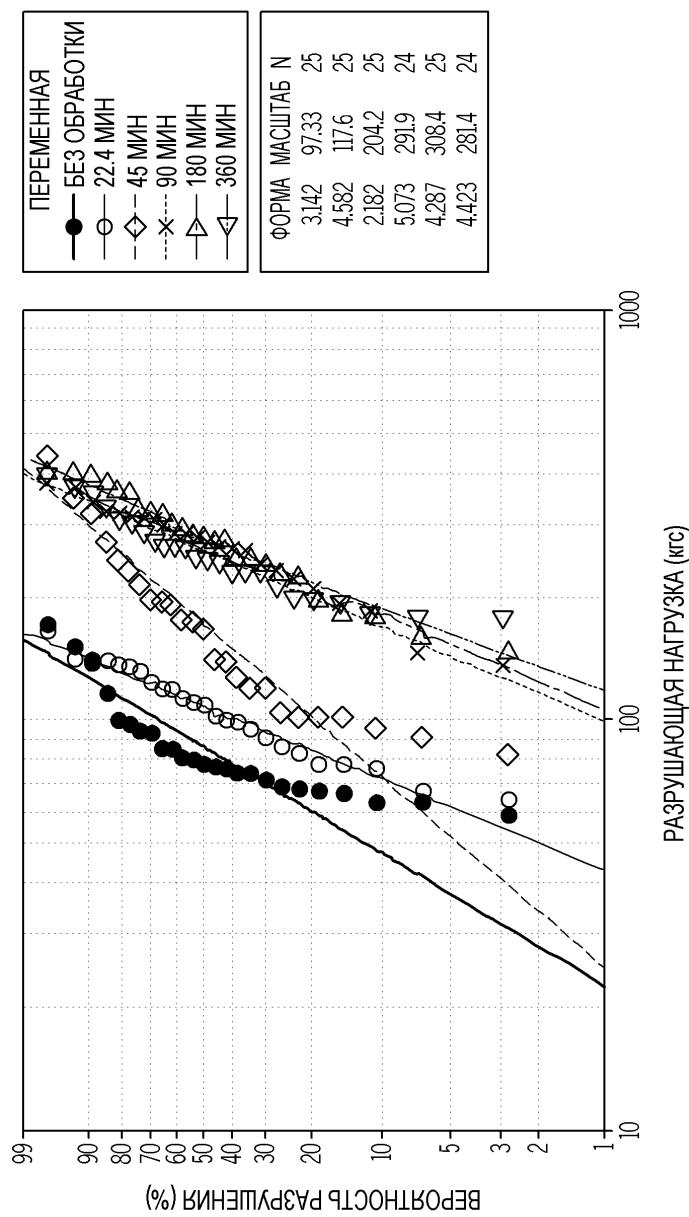


ФИГ. 11А



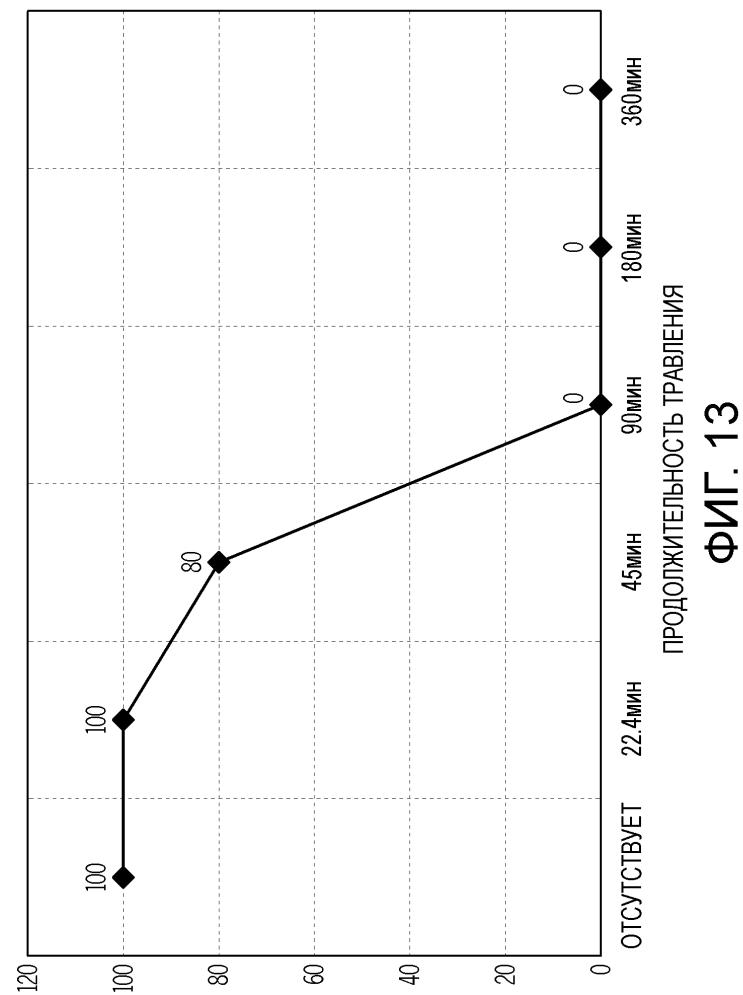
ФИГ. 11В

11/12



ФИГ. 12

12/12



ФИГ. 13