



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

B32B 3/26 (2019.02); B32B 15/01 (2019.02); F23R 3/02 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2017126147, 09.01.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.01.2016

Дата регистрации:
01.07.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
09.01.2015 US 62/101,827;
20.02.2015 US 62/118,821

(43) Дата публикации заявки: 12.02.2019 Бюл. № 5

(45) Опубликовано: 01.07.2019 Бюл. № 19

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 09.08.2017

(86) Заявка РСТ:
US 2016/012766 (09.01.2016)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2016/112365 (14.07.2016)

Адрес для переписки:
191036, Санкт-Петербург, а/я 24,
"НЕВИНПАТ"

(72) Автор(ы):

ИННЕС Меттью Кристофер (СА),
ФАМ Мин Кван (СА),
ШАНЗЕР Меган (СА),
ШАНИАН Али (СА),
ДЖАВИД Фархад (US),
БЕРТОЛДИ Катя (US),
ТЕЙЛОР Майкл Джеймс (US)

(73) Патентообладатель(и):

ПРЕЗИДЕНТ ЭНД ФЕЛЛОУС ОФ
ХАРВАРД КОЛЛЕДЖ (US),
ИННЕС Меттью Кристофер (СА),
ФАМ Мин Кван (СА),
ШАНЗЕР Меган (СА),
ШАНИАН Али (СА)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 2014260281 A, 18.09.2014. US
2011059291 A1, 10.03.2011. US 8652602 B1,
18.02.2014. US 2011159758 A1, 30.06.2011.

(54) Многослойная структура с отрицательным коэффициентом Пуассона

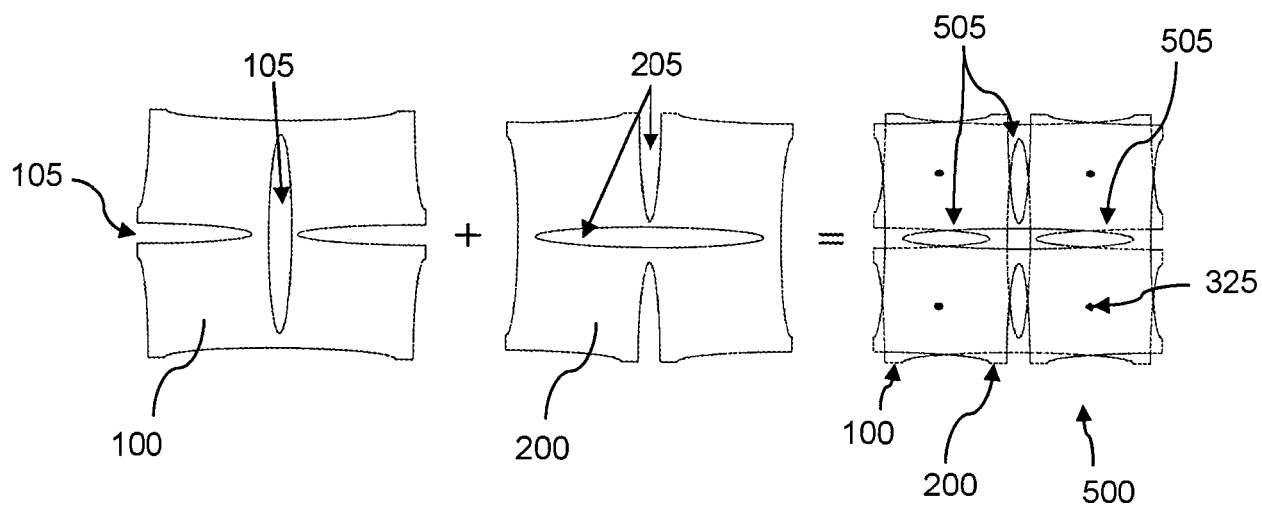
(57) Реферат:

Изобретение относится к пористым структурам с заданным коэффициентом Пуассона. Раскрыта ауксетическая структура, содержащая первый слой и второй слой, при этом первый слой определяет множество первых отверстий, выполненных согласно первому рисунку, и это множество первых отверстий обеспечивает первую пористость; и второй слой, определяющий множество вторых отверстий, выполненных согласно второму рисунку, обеспечивающему вторую пористость. Второй слой покрывает первый слой так, что множество вторых

отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество первых отверстий, определяя множество третьих отверстий согласно третьему рисунку, при этом множество третьих отверстий определяет третью пористость, которая меньше, чем первая пористость или вторая пористость. Второй слой связан с первым слоем множеством отдельных соединительных элементов. В других аспектах, в дополнение к вышеуказанным первому и второму слоям, имеется один или большее количество дополнительных слоев, определяющих отверстия и/или пористость.

Изобретение обеспечивает создание
ауксетических структур с разработанными
рисунками расположения, которые

демонстрируют поведение с отрицательным
коэффициентом Пуассона. 2 н. и 20 з.п. ф-лы, 6
ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

B32B 3/26 (2019.02); **B32B 15/01** (2019.02); **F23R 3/02** (2019.02)(21)(22) Application: **2017126147, 09.01.2016**(24) Effective date for property rights:
09.01.2016Registration date:
01.07.2019

Priority:

(30) Convention priority:
09.01.2015 US 62/101,827;
20.02.2015 US 62/118,821(43) Application published: **12.02.2019 Bull. № 5**(45) Date of publication: **01.07.2019 Bull. № 19**(85) Commencement of national phase: **09.08.2017**(86) PCT application:
US 2016/012766 (09.01.2016)(87) PCT publication:
WO 2016/112365 (14.07.2016)Mail address:
191036, Sankt-Peterburg, a/ya 24, "NEVINPAT"

(72) Inventor(s):

INNES Mettyu Kristofer (CA),
FAM Min Kvan (CA),
SHANZER Megan (CA),
SHANIAN Ali (CA),
DZHAVID Farkhad (US),
BERTOLDI Katya (US),
TEJLOR Majkl Dzhejms (US)

(73) Proprietor(s):

PREZIDENT END FELLOWS OF
KHARVARD KOLLEDZH (US),
INNES Mettyu Kristofer (CA),
FAM Min Kvan (CA),
SHANZER Megan (CA),
SHANIAN Ali (CA)(54) **MULTILAYER STRUCTURE WITH NEGATIVE POISSON COEFFICIENT**

(57) Abstract:

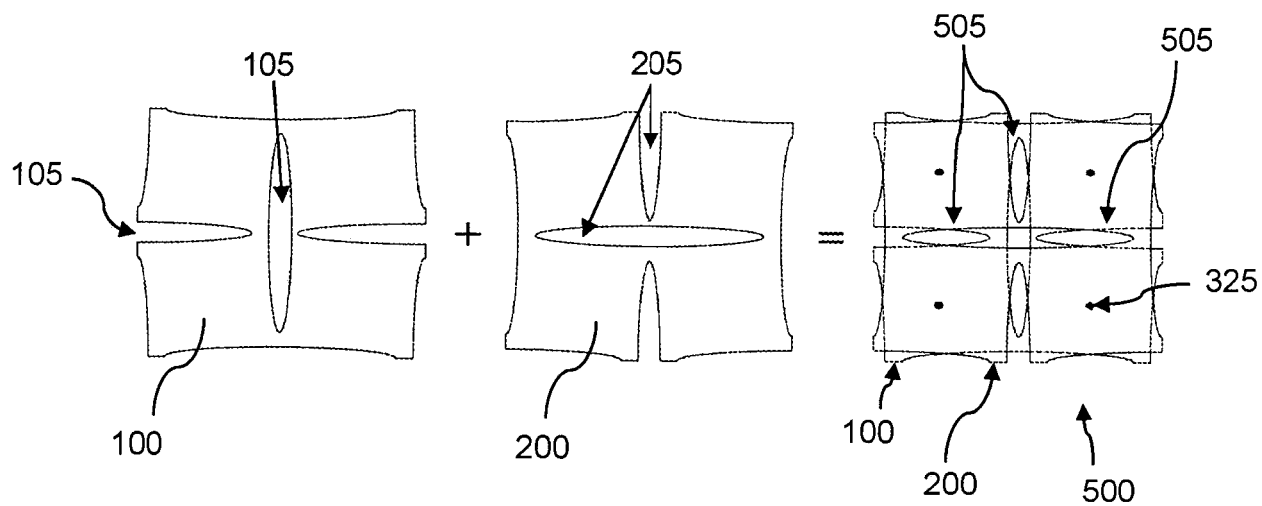
FIELD: laminated products or materials.

SUBSTANCE: invention relates to porous structures with given Poisson ratio. Disclosed is an auxetic structure comprising a first layer and a second layer, wherein the first layer defines a plurality of first openings made according to the first pattern, and the plurality of first openings provides a first porosity; and second layer defining plurality of second holes made according to second pattern providing second porosity. Second layer covers first layer so that plurality of second holes at least partially overlaps multiple first

holes, defining plurality of third holes according to third pattern, wherein a plurality of third holes define a third porosity that is less than the first porosity or second porosity. Second layer is connected to the first layer by multiple separate connecting elements. In other aspects, in addition to said first and second layers, there is one or more additional layers defining holes and/or porosity.

EFFECT: invention provides creating auxetic structures with developed location patterns that demonstrate behaviour with a negative Poisson ratio.

22 cl, 6 dwg



Фиг. 1

Перекрестные ссылки на связанные патенты

[0001] Настоящая заявка претендует на приоритет заявки на патент США №62/118821, зарегистрированной 20 февраля 2015 г., и заявки на патент США №62/101827, зарегистрированной 9 января 2015 г., обе из которых полностью включены в настоящий документ путем ссылки.

Область техники

[0002] Настоящее изобретение относится в целом к пористым структурам с заданным коэффициентом Пуассона. Более конкретно, аспекты настоящего изобретения относятся к так называемым ауксетическим структурам с искусственными рисунками, которые демонстрируют отрицательный коэффициент Пуассона (NPR), а также к системам, способам и устройствам, использующим такие структуры.

Предпосылки создания изобретения

[0003] При сжатии материалов вдоль некоторой оси они, как правило, расширяются в направлениях, поперечных к приложенной осевой нагрузке. Свойство материала, которое характеризует это поведение, известно как коэффициент Пуассона и определяется как взятое со знаком минус отношение поперечной/боковой деформации к осевой/продольной деформации при одноосной нагрузке. Большинство материалов характеризуются положительным коэффициентом Пуассона (например, приблизительно 0,3 для алюминия, меди и стали) и расширяются в поперечном направлении при осевом сжатии и сжимаются в поперечном направлении, когда их растягивают в осевом направлении. Однако материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (NPR-материалы), известные также как «ауксетические» материалы, сужаются в поперечном направлении, будучи сжаты в осевом направлении, и расширяются в поперечном направлении, когда их растягивают в осевом направлении.

[0004] В патенте США №5233828 (далее «патент 828») показан пример сконструированного строительного элемента - облицовки камеры сгорания, - используемого в высокотемпературных приложениях. Облицовка камеры сгорания в общем случае используется в секции сгорания газовой турбины, но может также использоваться в выпускной секции или в других секциях или компонентах газовой турбины, таких как турбинные лопатки. При работе газ, вырабатываемый при сгорании, имеет высокую температуру, например 3000°F (1649°C) или выше. Чтобы эта высокая температура не повредила камеру сгорания прежде, чем газ дойдет до турбины, в камеру сгорания вставляют облицовку, чтобы изолировать окружающий двигатель. Для минимизации температуры и перепада давления в оболочке камеры сгорания традиционно создают охлаждающие щели, как показано в патенте 828. В этом патенте 828 показана часть кольцевой оболочки камеры сгорания, имеющей пространственно разделенные охлаждающие отверстия, расположенные в виде непрерывного рисунка и наклоненные к стенке оболочки. В патенте США №8066482 В2 показан другой пример сконструированной структурной детали, имеющей охлаждающие отверстия такой формы, чтобы увеличить охлаждение желательной области газовой турбины и уменьшить уровни напряжения внутри и вокруг охлаждающих отверстий. В Европейском патентном документе EP 0971172 A1 аналогично показан другой пример перфорированной оболочки, используемой в зоне горения газовой турбины.

[0005] В еще одном примере, в заявке на патент США №2010/0009120 A1, раскрыто несколько трансформируемых периодических структур, которые включают эластомерные или упругопластические периодические твердые тела, которые испытывают трансформацию структурной конфигурации при приложении критического макроскопического напряжения или деформации. В заявке PCT/US2014/025324 раскрыты,

среди прочего, пористые структуры с повторяющимся рисунком удлиненных отверстий, обеспечивающие отрицательный коэффициент Пуассона. В заявке РСТ/US2014/024830 раскрыто, среди прочего, твердое тело, имеющее сконструированную полую структуру, которая заставляет твердое тело (имеющее положительный коэффициент Пуассона)

5 демонстрировать псевдо-ауксетическое (NPR) поведение при приложении напряжения к твердому телу. Сконструированная пористая структура обеспечивает такую пористость, которая необходима в приложениях, где имеются камеры сгорания газовой турбины. Все цитированные выше документы полностью включены в настоящее описание путем ссылки.

10 Сущность изобретения

[0006] Аспекты настоящего изобретения относятся к структурам с отрицательным коэффициентом Пуассона (NPR), а в частности - к ауксетическим структурам для промышленного применения, в котором важными конструктивными признаками являются расширение и пористость.

15 [0007] В некоторых аспектах настоящих концепций, ауксетическая структура содержит первый слой и второй слой, при этом первый слой определяет множество первых отверстий, выполненных согласно первому рисунку, и это множество первых отверстий обеспечивает первую пористость, а второй слой определяет множество вторых

20 Второй слой покрывает первый слой так, что множество вторых отверстий по меньшей мере частично перекрывают множество первых отверстий и определяют множество третьих отверстий согласно третьему рисунку, при этом множество третьих отверстий определяет третью пористость, меньшую, чем первая пористость или вторая пористость. Второй слой связан с первым слоем множеством отдельных соединительных элементов.

25 В некоторых аспектах первый слой и второй слой имеют одинаковую пористость и одинаковый тип пустот, и единственная разница между ними состоит в их взаимной ориентации и/или их масштабном коэффициенте.

[0008] Согласно некоторым аспектам настоящих концепций, ауксетическая структура содержит первый ауксетический слой, определяющий множество первых отверстий,

30 выполненных согласно первому рисунку, при этом указанное множество первых отверстий определяет первую пористость, второй ауксетический слой, определяющий множество вторых отверстий, выполненных согласно второму рисунку, при этом указанное множество вторых отверстий определяет вторую пористость, и третий ауксетический слой, определяющий множество третьих отверстий, выполненных

35 согласно третьему рисунку, при этом множество третьих отверстий определяет третью пористость. Третий ауксетический слой покрывает второй ауксетический слой так, что множество третьих отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество вторых отверстий, а второй ауксетический слой покрывает первый ауксетический слой так, что множество вторых отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество

40 первых отверстий. Третий ауксетический слой связан со вторым ауксетическим слоем множеством соединительных элементов, и аналогично второй ауксетический слой связан с первым ауксетическим слоем множеством соединительных элементов. Только центральные точки ячеек связаны друг с другом, поскольку эти точки имеют одинаковую модель деформации при приложении внешней нагрузки.

45 [0009] Согласно другим аспектам настоящих концепций, компьютерный способ производства многослойной ауксетической структуры включает получение, через одно или большее количество устройств ввода, функционально ассоциированных с компьютером, конструктивных требований к многослойной структуре, при этом

принятые конструктивные требования включают по меньшей мере одно из следующего: необходимую заданную пористость, заданное значение отрицательного коэффициента Пуассона (NPR) и заданную жесткость. Способ также включает использования компьютера для построения модели для множества слоев, при этом каждый из слоев определяет расположение элементарной ячейки и параметры отверстий, и построение модели многослойной структуры с использованием указанного множества слоев, при этом каждый из множества слоев связан в центральных точках элементарных ячеек по меньшей мере с соседним из множества слоев. Способ также включает использования компьютера для моделирования многослойной структуры при моделируемой нагрузке и определение, удовлетворяет ли эта многослойная структура конструктивным требованиям. В противном случае компьютер выполняет наборы команд, заставляющие компьютер многократно совершать следующие действия (i): модификацию по меньшей мере одного аспекта модели по меньшей мере для одного из множества слоев, модели многослойной структуры или как модели по меньшей мере для одного из множества слоев, так и модели многослойной структуры, и (ii) моделирование многослойной структуры при моделируемой нагрузке, - пока модель многослойной структуры не удовлетворит конструктивным требованиям. Способ также включает команду компьютеру сохранить модель многослойной структуры на долговременном физическом считываемом компьютером носителе данных.

[0010] Это краткое описание не предназначено для охвата каждого варианта выполнения или каждого аспекта настоящего изобретения. Оно просто иллюстрирует некоторые из сформулированных здесь новых аспектов и признаков. Вышеуказанные особенности и преимущества, а также другие особенности и преимущества настоящего изобретения будут очевидны из последующего подробного описания репрезентативных вариантов выполнения настоящего изобретения и режимов выполнения настоящего изобретения совместно с сопровождающими чертежами и формулой изобретения.

Краткое описание чертежей

[0011] На фиг. 1 показано недеформированное расположение ауксетического слоя, изолированно и в комбинации, для формирования многолистовой или многослойной ауксетической структуры согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения.

[0012] На фиг. 2 показана другая техника комбинирования слоев для формирования многолистовой или многослойной ауксетической структуры, при этом передний слой имеет такие размеры, чтобы обеспечить отношение 1:2 между элементарными ячейками слоев согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения.

[0013] На фиг. 3 показана еще одна техника комбинирования слоев для формирования многолистовой или многослойной ауксетической структуры, при этом передний слой имеет такие размеры, чтобы обеспечить отношение 1:3 между элементарными ячейками слоев согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения.

[0014] На фиг. 4 показана еще одна техника комбинирования слоев для формирования многолистовой или многослойной ауксетической структуры, при этом передний слой имеет такие размеры, чтобы обеспечить отношение $1:\sqrt{2}$ между элементарными ячейками слоев, а задний слой повернут на 45° относительно переднего слоя согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения.

[0015] На фиг. 5 показано S-образное отверстие согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения.

[0016] На фиг. 6 показана последовательность операций, поясняющая общие аспекты компьютерного способа построения модели и образца для многолистовой или

многослойной ауксетической структуры согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения.

[0017] В настоящем изобретении могут быть сделаны различные модификации и альтернативные формы, и некоторые репрезентативные варианты выполнения настоящего изобретения описаны подробно ниже со ссылками на сопровождающие чертежи. Следует понимать, однако, что аспекты изобретения не ограничены конкретными формами, показанными на чертежах. Изобретение охватывает все модификации, эквиваленты, комбинации и альтернативы, соответствующие сущности и находящиеся в объеме изобретения, определяемого пунктами формулы изобретения.

10 Подробное описание иллюстративных вариантов выполнения настоящего изобретения

[0018] Настоящее изобретение может быть выполнено в различных вариантах и во многих формах. Ниже будут подробно описаны со ссылками на сопровождающие чертежи репрезентативные варианты выполнения настоящего изобретения, но следует 15 понимать, что данное описание следует рассматривать как иллюстрацию принципов настоящего раскрытия, и оно не должно рассматриваться как ограничивающее широкие аспекты изобретения, иллюстрируемые вариантами его выполнения. При этом элементы и ограничения, которые раскрыты, например, в реферате, описании сущности изобретения и подробном описании, но не сформулированы в пунктах формулы изобретения явно, не следует считать включенными в пункты формулы изобретения, по отдельности или вместе, прямо или косвенно и т.д. Для целей данного подробного описания, если явно не сказано иначе и не запрещено логически: единственное число включает множественное число и наоборот; и слова «включающий», «содержащий» или «имеющий» означают «включающий без ограничений». Кроме того, слова, 25 обозначающие приближение, такие как «примерно», «почти», «по существу», «приблизительно» и т.п., могут использоваться здесь, например, в смысле «точно, около или почти точно», или «в пределах 3-5%», или «в пределах приемлемых производственных допусков», или в любой логической комбинации перечисленного.

[0019] Аспекты настоящего изобретения относятся к гибридным ауксетическим структурам типа "ямки-и-пустоты"; эти структуры включают повторяющиеся рисунки 30 из отверстий и выступов, которые обеспечивают отрицательный коэффициент Пуассона (NPR) при макроскопической нагрузке материала. Коэффициент Пуассона (или отношение Пуассона) представляет собой отношение деформации поперечного сжатия к деформации продольного растяжения в растягиваемом объекте. Коэффициент Пуассона как правило положителен для большинства материалов, включая многие сплавы, полимеры, полимерные пены и ячеистые твердые тела, которые при растяжении становятся тоньше в поперечном сечении. Ауксетические структуры, раскрытые здесь, демонстрируют отрицательный коэффициент Пуассона.

[0020] Согласно аспектам раскрытых концепций изобретения, когда ауксетическая 40 структура сжата вдоль одной оси (например, в направлении Y), коаксиальная деформация приводит к возникновению момента сил вокруг центра каждой ячейки, вследствие того, как расположены соседние отверстия. Это, в свою очередь, заставляет ячейки поворачиваться. Каждая ячейка поворачивается в направлении, противоположном направлению поворота ее непосредственных соседей. Этот поворот приводит к уменьшению расстояния между горизонтально соседними ячейками вдоль поперечной оси (направление вдоль оси x). Другими словами, сокращение структуры в направлении Y заставляет ее сокращаться и в направлении X. И наоборот, растяжение в направлении Y приводит к расширению в направлении X. В масштабе всей структуры

это напоминает поведение ауксетического материала. Но многие из структур, раскрытых здесь, составлены из обычных материалов. Таким образом, сам материал может иметь положительный коэффициент Пуассона, но модифицированная структура после введения раскрытых здесь рисунков и комбинаций отверстий ведет себя, локально и/или

глобально, как имеющая отрицательный коэффициент Пуассона.

[0021] Как показано, например, на фиг. 1, NPR-структура 500 имеет рисунки 105, 205 из отверстий, представленных в плоскости X-Y и предназначенных для создания результирующего рисунка 505 отверстий в плоскости Z (перпендикулярной к бумаге). Эти отверстия могут также действовать как охлаждающие и/или демпфирующие отверстия и, благодаря их расположению, также как средства для уменьшения напряжения. Как показано на фиг. 1, отверстия 105, 205 определяют горизонтально ориентированные и вертикально ориентированные удлиненные (например эллиптические) структуры (также называемые здесь «отверстиями», «пустотами», «щелями» или «сквозными отверстиями»). По меньшей мере в некоторых аспектах настоящего изобретения эти удлиненные отверстия расположены согласно повторяющимся рисункам, которые могут быть локальными или глобальными по протяженности, такими как массив с по меньшей мере по существу равномерно распределенными строками и столбцами из отверстий. Как показано в примере на фиг. 1, горизонтально ориентированные и вертикально ориентированные отверстия 105, 205 чередуются так, что вертикально ориентированное отверстие расположено рядом с горизонтально ориентированным отверстием и наоборот.

[0022] Раскрытые здесь NPR-структуры могут быть использованы, например, в стенке камеры сгорания газовой турбины, для которой требуется некоторая «пористость» (то есть, отверстия для потока охлаждающего воздуха), определяемая в общем случае как площадь A_A поверхности отверстий, деленная на площадь A_S поверхности структуры, или Пористость = A_A/A_S . Например, для конкретного компонента может потребоваться пористость 40-50%. В различных аспектах настоящего изобретения пористость раскрытой NPR-структуры может быть сделана такой, чтобы обеспечить любую желаемую пористость между, например, 0-50% (или, например, между 0,3-9%, между 1-4%, приблизительно 2% и т.д.), путем селективной комбинации двух или большего количества слоев структур (например, структур 100, 200 на фиг. 1), имеющих отверстия (например, отверстия 105, 205 на фиг. 1). Как показано на фиг. 1, комбинация первого слоя 100, имеющего первый рисунок отверстий 105, и второго слоя 100, имеющего второй рисунок отверстий 205, образует NPR-структуру 500, имеющую третий рисунок отверстий 505. По меньшей мере в некоторых аспектах настоящего изобретения каждый первый слой 100 и второй слой 200 имеет одинаковые рисунки отверстий (например, отверстий 105) с формированием NPR-структуры 500, соединенной посредством соединительных элементов 325, при этом первый и второй слои соединены со сдвигом рисунков отверстий 105, при этом такой сдвиг представляет собой один или большее количество боковых сдвигов (например, в плоскости X-Y) и/или нормальный сдвиг (то есть, сдвиг в направлении по оси Z), и/или поворотный сдвиг (например, первый слой 100 повернут относительно второго слоя на выбранный угол).

[0023] В некоторых вариантах выполнения настоящего изобретения материал одного или большего количества слоев 100, 200 включает суперсплав, такой как NPR суперсплав на основе никеля, включая, но этим не ограничиваясь Inconel (например, IN100, IN600, IN713), Waspaloy, сплавы Rene (например, Rene 41, Rene 80, Rene 95, Rene H5), сплавы Haynes, Incoloy, MP98T, TMS или монокристаллические сплавы CMSX (например, CMSX-4). Настоящие концепции не ограничены материалом и могут включать другие

материалы (например, нержавеющей сталь, титан и т.д.), подходящие для использования в конкретном приложении, в котором используется структура с пористостью, отличной от нуля. Например, NPR-структура 500 может содержать первый слой 100 из композиции первого материала, второй слой 200 из композиции второго материала, третий слой из композиции третьего материала и так далее. Альтернативно, каждый из слоев, формирующих NPR-структуру 500, может содержать тот же самый материал.

[0024] Каждый слой 100, 200, а также NPR-структура 500, имеет предварительно выбранный формат удлиненных отверстий 105, 205, 505. В контексте настоящего изобретения термин «формат» отверстий означает отношение длины отверстия к ширине отверстия, или длину большой оси, деленную на длину малой оси отверстия. В некоторых вариантах выполнения настоящего изобретения может быть желательно, чтобы формат отверстий составлял приблизительно 5-40 или в некоторых вариантах выполнения настоящего изобретения - приблизительно 20-30. Что касается размеров, раскрытые концепции и структуры представлены с использованием рисунков отверстий, имеющих масштаб длины в миллиметрах; однако эти концепции не ограничены никаким конкретным масштабом и одинаково применимы к структурам, обладающим теми же самыми рисунками и структурами в меньшем или большем масштабе длины.

[0025] Возвращаясь к фиг. 1, первый слой 100 и второй слой 200 из высокопористого псевдо-ауксетического листа, например, раскрытого в документах WO 2014151045 A1 или US 20110059291 A1, - оба из которых полностью включены в настоящий документ путем ссылки, соединены друг с другом так, чтобы обеспечить, что каждый слой по меньшей мере частично перекрывает или покрывает отверстия другого слоя (например, слой 200 по меньшей мере частично перекрывает отверстия 105 в первом слое 100). В некоторых аспектах некоторый слой (например 200) расположен так, чтобы по большей части (например, больше, чем на 50%) перекрывать или покрывать отверстия (например 105) в соседнем слое (например, слое 100). Управляя выбором отверстий в каждом из множества слоев и относительным положением слоев друг относительно друга, можно управлять эффективной пористостью структуры, обеспечивая конкретную пористость (например, низкую процентную пористость или даже нулевую пористость), а следовательно настоящие концепции могут быть использованы во множестве приложений, включая приложения, в которых требуется нулевая пористость.

[0026] Что касается крепления одного слоя (например, слоя 100) к другому слою (например, слою 200), слои могут быть присоединены друг к другу многими обычными способами, и ниже приведено несколько иллюстративных примеров.

[0027] В первом примере, как показано на фиг. 1, два одинаковых ауксетических или псевдо-ауксетических слоя или листа 100, 200 расположены рядом друг с другом так, что второй слой 200 повернут на 90° относительно первого слоя 100. Как показано на фиг. 1, слои соединены в центральные точки их элементарных ячеек, в которых у слоев есть возможность относительного вращения, но их относительное смещение равно нулю. Так как элементарные ячейки слоев вращаются в противоположных направлениях при той же самой нагрузке, целесообразно использовать в качестве соединительных элементов 325 заклепочные соединения, поскольку они допускают поворот элементарных ячеек.

[0028] Во втором примере, показанном на фиг. 2, два одинаковых ауксетических или псевдо-ауксетических слоя или листа 100, 200 расположены рядом друг с другом так, что второй слой 200 повернут на 90° относительно первого слоя 100. На фиг. 2 субструктура одного слоя (то есть, в данном случае слоя 200) имеет размеры вдвое меньше (масштаб 1:2) относительно другого слоя (то есть, слоя 100). В этой

конфигурации слои 100, 200 соединены посредством комбинации различных типов соединительных элементов 325, 325' в центральных точках слоя (например 100) с подструктурой больших размеров. Так как направление поворота половины элементарных ячеек при нагрузке одинаковое в обоих слоях, для их связи можно использовать сварные соединения 325', в то время как другая половина связана с использованием заклепок 325, которые допускают относительное вращение. Предпочтительно, чтобы слои 100, 200 были соединены в центральных точках их элементарных ячеек, поскольку в этой точке слои могут обладать осью относительного вращения при нагрузке, но не демонстрируют относительного смещения. Как отмечено выше, там, где элементарные ячейки слоев поворачиваются в противоположных направлениях при одинаковой нагрузке, в качестве соединительных элементов 325 можно использовать заклепочные соединения, поскольку они допускают относительное вращение элементарных ячеек.

[0029] В третьем примере NPR-структуры 500, показанной на фиг. 3, два одинаковых ауксетических или псевдо-ауксетических слоя или листа 100, 200 расположены рядом друг с другом так, что второй слой 200 повернут на 90° относительно первого слоя 100. На фиг. 3 подструктура одного слоя (то есть, на чертеже, слоя 200) имеет размеры в n раз меньше (масштаб 1: n) относительно другого слоя (то есть, слоя 100)), где n может быть любым целым числом, но в данном примере оно равно 3, то есть масштаб составляет 1:3. В этой конфигурации слои 100, 200 связаны посредством соединительных элементов 325', включающих сварные соединения в центральных точках слоев (например 100) с подструктурой большего масштаба. Альтернативно, в варианте выполнения настоящего изобретения, показанном на фиг. 3, могут использоваться заклепочные соединительные элементы 325.

[0030] В NPR-структуре 500, показанной на фиг. 4, один из слоев или листов (например, задний слой 100) повернут на 45°, имеет размеры структуры в $\sqrt{2}$ раз меньше (масштаб 1: $\sqrt{2}$ или 1:1,4142) и связан с другим изображенным слоем или листом (например 200). В этой конструкции половина соединительных элементов 325 является заклепочными соединениями (там, где направление поворота элементарных ячеек под нагрузкой между слоями 100, 200 отличается), в то время как другие соединительные элементы 325' (где направление поворота элементарных ячеек при нагрузке между слоями 100, 200 одинаково) сварены или склепаны.

[0031] В приведенных выше примерах рассматривались связи и соединения между двумя ауксетическими слоями 100, 200; однако следует подчеркнуть, что настоящая концепция предусматривает использование любого количества листовых слоев, в частности ауксетических слоев, для управления пористостью NPR-структуры 500.

[0032] Хотя концепции многослойной ауксетической структуры и способов формирования многослойной ауксетической структуры раскрыты на примере слоев или листов с эллиптическими отверстиями 105, 205, могут использоваться ауксетические слои или листы с любой формой отверстий (например, стопорные отверстия, двойные Т-образные пустоты, S-образные щели и т.д.), а также соединительные элементы (например, заклепки, сварные швы, и т.д.) с формированием многослойной ауксетической или NPR-структуры в соответствии с настоящими концепциями. Для наглядности на фиг. 5 показан пример NPR-слоя 400, включающего сквозные S-образные щели 405. В соответствии с примером на фиг. 1, множество слоев 400 показанных на фиг. 5 (и/или других слоев, например, но этим не ограничиваясь, слоев 100, 200 на фиг. 1), может быть расположено рядом друг с другом и связано посредством соединительных элементов 325 так, чтобы обеспечить при необходимости относительное перемещение

множества элементарных ячеек под нагрузкой.

[0033] Многослойная структура согласно аспектам настоящего изобретения не только обеспечивает ауксетические свойства, но также позволяет добиться заданной пористости. Например, вышеуказанные способы могут использоваться для создания NPR-структуры, имеющей пористость 1,6% путем комбинирования первого слоя, имеющего рисунок с пористостью 5% и включающего эллиптические пустоты (см., например, фиг. 1), со вторым слоем, также имеющим рисунок с пористостью 5% и включающим эллиптические пустоты, при этом аспектное отношение эллипсов в обоих слоях равно 30. Если эти два слоя связаны с использованием техники соединения, показанной на фиг. 1 (то есть, идентичные слои связаны друг с другом, при этом второй слой повернут на 90° относительно первого слоя), то создается NPR-структура, имеющая пористость 1,6%. Наложение отверстий (например, 105, 205, 405, и т.д.) согласно настоящим концепциям, в особенности с допустимым разнообразием при выборе аспектных отношений и масштабов одного или большего количества слоев, обеспечивает любую желаемую пористость. Например, если в вышеуказанном примере использовать S-образные щели (см. фиг. 5), а не эллиптические отверстия, уменьшение пористости будет еще более существенным (в результате пористость станет меньше, чем 1,6%).

[0034] Хотя особо подчеркивалось применение ауксетических структур конкретно в компонентах газовой турбины, концепция может быть применена к другим промышленным компонентам, где при конструировании следует учитывать поперечное термомеханическое расширение и/или усталостное разрушение.

[0035] Согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения, конструкция NPR-структуры 300 задана известным конечным значением пористости, которое должно быть достигнуто, а также заданным отрицательным коэффициентом Пуассона и максимальным допустимым напряжением структуры. В пределах этого конструктивного диапазона определяют допустимую для приложения геометрию отверстий (например, схему размещения, форму (например, эллиптическую, S-образную и т.д.), размер, и т.д.). Может быть определено, что конструктивный диапазон допускает использование однослойной NPR-структуры, имеющей соответствующее значение пористости, и такая структура с единственным NPR-слоем может быть использована в соответствии с обычными способами. Однако, если пористость этой однослойной NPR-структуры выше, чем пористость, необходимая для приложения, может быть сконструировано и создано множество слоев или листов (например, 100, 200 и т.д.) с формированием заданной многослойной NPR-структуры, имеющей желаемую пористость. В общем случае для соединения слоев друг с другом нет никаких предпочтений среди различных конфигураций, показанных на фиг. 1-4. Конечная конфигурация для NPR-структуры 300 определяется заданной пористостью.

[0036] Например, для множества слоев фиксированной пористости, имеющих эллиптические пустоты, уменьшение пористости, обеспечиваемое комбинациями из двух (или большего количества) ауксетических слоев, связано обратной зависимостью с аспектным отношением эллипсов, так что слои с большим аспектным отношением эллипсов обеспечивают большее уменьшение пористости, чем слои с меньшим аспектным отношением эллипсов. Степень уменьшения пористости связана также с количеством используемых слоев: чем больше количество слоев, используемых в комбинации, тем сильнее уменьшение пористости.

[0037] На фиг. 6 схематично показана последовательность операций для способа проектирования и изготовления ауксетической структуры согласно по меньшей мере некоторым аспектам настоящего изобретения. Фиг. 6 иллюстрирует обобщенные

аспекты одного неограничивающего процесса проектирования NPR-структуры с использованием компьютера (например, с использованием системы автоматизированного проектирования (CAD) или автоматизированного компьютерного производства (САМ-системы) для выполнения любой из выше или ниже описанных функций, ассоциированных с раскрытыми концепциями.

[0038] В качестве отправной точки способ требует ввода соответствующих конструктивных требований для структуры, таких как, но этим не ограничиваясь, требования к внешней нагрузке, требования к тепловому затуханию, коэффициенту Пуассона (если задан), пористости, жесткости и так далее. По этим конструктивным требованиям определяют, можно ли удовлетворить этим конструктивным требованиям с использованием ауксетической (NPR) структуры. Например, NPR-структура может оказаться полезной, если расчетное приложение структуры - тепловое напряжение, которое доминирует или действует постоянно в условиях нагрузки с управляемым смещением. Если определено, что использование ауксетической структуры нецелесообразно, используют структуры обычной конструкции.

[0039] Однако, если целесообразно, чтобы структура включала NPR-структуру, определяют значение отрицательного коэффициента Пуассона или ожидаемый приемлемый диапазон значений для структуры, по меньшей мере частично, по остаточным принятым конструктивным значениям. В зависимости от доминирующих конструктивных переменных (например, жесткости, пористости и т.д.), в качестве отправной точки для дальнейшего анализа и моделирования принимают начальную конструкцию многослойной структуры в соответствии с настоящими концепциями (например, способами, показанными на каждой из фиг. 1-4). Например, если структура требует конкретного значения NPR (или значения в пределах диапазона допустимых значений NPR), выбирают конструктивные параметры щелей, рисунки, иерархическое представление и ориентацию слоев, чтобы наилучшим образом приблизиться к желательному значению (значениям) NPR, одновременно удовлетворяя сопутствующим конструктивным переменным (например пористости, жесткости и т.д.). В некоторых аспектах настоящих концепций обычно определяют, требует ли структура нулевой пористости и/или высокой жесткости, средней пористости (например, если оптимальная ожидаемая пористость находится в диапазоне между 0 и приблизительно 9% для оптимального приложения) и/или средней жесткости или высокой пористости (например, если ожидаемая оптимальная пористость выше приблизительно 9%), и/или низкой жесткости.

[0040] Как только общие конструктивные ограничения для структуры установлены, выбирают дополнительные детали для каждого слоя многослойной структуры, чтобы установить отправную точку для дальнейшего компьютерного моделирования, включая, но не этим не ограничиваясь, выбор (для каждого слоя) параметров (например, формы, масштаба и т.д.) щелей/отверстий (например, отверстий 105, 205 на фиг. 1), расположения элементарных ячеек, количества слоев и взаимной ориентации слоев. Затем выполняют компьютерное моделирование, чтобы определить, удовлетворяет ли конструкция всем конструктивным требованиям (например, заданной пористости, заданной жесткости и т.д.). Если не все конструктивные требования удовлетворены, компьютерная система моделирования, многократно выполняя способ, изменяет одну или большее количество конструктивных переменных (например, увеличивает или уменьшает размер отверстий, изменяет форму отверстий, добавляет или убирает слои, изменяет взаимную ориентацию одного слоя по отношению к другому слою, увеличивает или уменьшает площадь отверстий и т.д.) в качестве входных параметров для следующей итерации в рамках

компьютерного моделирования. Этот процесс продолжается по меньшей мере до тех пор, пока конструкция не удовлетворит всем конструктивным требованиям, и может использовать одну из большее количество обычных конструктивных моделей, таких как (но этим не ограничиваясь) модель стоимости, модель демпфирования, модель
 5 охлаждения, модель напряжения и так далее. По желанию, но не обязательно, этот процесс продолжается, пока не определят набор параметров, удовлетворяющих всем конструктивным требованиям, а по этим параметрам можно определить оптимальную конструкцию для конкретного приложения (например, с самой низкой стоимостью, самым длительным сроком службы и т.д.).

10 [0041] Как только подходящая конструкция определена, ее сохраняют на физическом считываемом компьютере носителе для последующей (или по существу одновременной) передачи в удаленный компьютер или систему числового компьютерного управления (CNC) через подходящее обычное беспроводное или проводное устройство связи.

Процесс проектирования, раскрытый в общих чертах, предпочтительно осуществляют
 15 с помощью компьютера с использованием выполняемого компьютером набора (наборов) инструкций, содержащихся на физическом считываемом компьютере носителе, таком как жесткий диск, магнитная лента, магнитное запоминающее устройство, CD-ROM, DVD, оперативное запоминающее устройство (RAM), программируемая постоянная память (PROM), стираемая программируемая постоянная
 20 память (EPROM), FLASH-EPROM или полупроводниковое запоминающее устройство (микросхема памяти, флеш-карта и т.д.). Этот набор (наборы) инструкций выполняют одним или большим количеством процессоров, функционально ассоциированных с компьютером (например, настольным компьютером, ноутбуком, планшетным компьютером, переносным устройством и т.д.) для проектирования многослойной
 25 NPR-структуры с заранее набором параметров (например, с максимальным напряжением, минимальным заранее заданным сроком службы и т.д.) и сохраняют и/или передают такой проект во внешний компьютер или систему. Например, внешний компьютер или система содержит CNC-машину (например, лазерный режущий инструмент), используемый для формирования индивидуальных слоев многослойной
 30 NPR-структуры, чтобы заставить CNC-машину создавать такой один слой или большее количество слоев многослойной структуры.

[0042] В соответствии с настоящими концепциями, однородная или «универсальная» однослойная структура (однолистный материал, имеющий отверстия с конкретной пористостью и геометрией) может использоваться для изготовления множества
 35 различных NPR-структур, имеющих множество различных значений пористости. Эти NPR-структуры обеспечивают более низкие напряжения и большую долговечность, определяемую усталостью, чем обычные структуры, и могут быть дополнительно выбраны так, чтобы они имели более высокую жесткость и лучшую способность держать нагрузку.

40 [0043] Настоящее изобретение может использоваться в широком диапазоне промышленных компонентов, в которых важны термическое расширение и пористость (или отсутствие пористости), включая, но этим не ограничиваясь, компоненты турбин, теплообменники, трубопроводы, опоры, фюзеляжи, компоненты автомобилей и других транспортных средств или любую другую структуру или компонент, подвергаемый
 45 механической и/или тепловой нагрузке. Например, обнаружено, что если одинаковый тип слоев (например, с эллиптическими отверстиями с размером, равным 30), скреплены с использованием технического решения, показанного на фиг. 2, пористость структуры с двойным слоем уменьшается до нуля. Таким образом, даже для непористых NPR-

структур можно использовать настоящие концепции для создания желаемой NPR-структуры из множества однородных однослойных структур.

[0044] Слои, например из тонколистовой стали или сплава Inconel, могут быть изготовлены с использованием лазерной резки с числовым компьютерным управлением (CNC) или другого известного производственного процесса (например, пробивки, прямой или фасонной резки, перфорирования, пилки, резки газовой горелкой, обработкой струей воды и т.д.) и могут затем быть сварены или склепаны друг с другом с формированием необходимых соединений.

[0045] Настоящее изобретение не ограничено точными конструкциями и составами, раскрытыми здесь. Напротив, все и каждое изменение, модификации и вариации, очевидные из предыдущего описания, находятся в объеме и соответствуют сущности изобретения, определенного пунктами формулы изобретения. Кроме того, настоящие концепции включают все и каждую из комбинаций и субкомбинаций предыдущих элементов и аспектов.

(57) Формула изобретения

1. Ауксетическая структура, содержащая:

первый слой, определяющий множество первых отверстий, выполненных согласно первому рисунку, при этом множество первых отверстий определяет первую пористость;

и

второй слой, определяющий множество вторых отверстий, выполненных согласно второму рисунку, при этом множество вторых отверстий определяет вторую пористость,

при этом второй слой покрывает первый слой так, что множество вторых отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество первых отверстий и определяет множество третьих отверстий согласно третьему рисунку, при этом множество третьих отверстий определяет третью пористость, которая меньше, чем первая пористость или вторая пористость, и

второй слой связан с первым слоем множеством отдельных соединительных элементов.

2. Ауксетическая структура по п. 1, в которой множество первых отверстий включает удлиненные отверстия, имеющие большую ось, которая перпендикулярна малой оси.

3. Ауксетическая структура по п. 2, в которой множество вторых отверстий включает удлиненные отверстия, имеющие большую ось, которая перпендикулярна малой оси.

4. Ауксетическая структура по п. 3, в которой первый рисунок и второй рисунок содержат множество рядов удлиненных отверстий, при этом в каждом ряду положения больших и малых осей удлиненных отверстий чередуются.

5. Ауксетическая структура по п. 4, в которой первая пористость и вторая пористость по меньшей мере, по существу, одинаковы.

6. Ауксетическая структура по п. 3, в которой аспектные отношения первых отверстий и вторых отверстий одинаковы.

7. Ауксетическая структура по п. 1, в которой первые отверстия включают S-образные сквозные щели.

8. Ауксетическая структура по п. 6, в которой вторые отверстия включают S-образные сквозные щели.

9. Ауксетическая структура по п. 1, в которой множество вторых отверстий закрывает по меньшей мере пятьдесят процентов площади множества первых отверстий.

10. Ауксетическая структура по п. 1, в которой множество отдельных соединительных элементов содержит штифты или заклепки, расположенные в находящих одна над

другой центральных точках элементарных ячеек первого слоя и второго слоя, при этом направления поворота элементарной ячейки первого слоя и элементарной ячейки второго слоя при нагрузке противоположны.

11. Ауксетическая структура по п. 1, в которой множество отдельных соединительных элементов содержит сварные соединения, расположенные в находящиеся одна над другой центральных точках элементарных ячеек первого слоя и второго слоя, при этом направления поворота элементарной ячейки первого слоя и элементарной ячейки второго слоя при нагрузке совпадают.

12. Ауксетическая структура по п. 1, в которой как первый слой, так и второй слой содержат металлический лист.

13. Ауксетическая структура по п. 1, в которой конфигурации первого слоя и второго слоя одинаковы.

14. Ауксетическая структура, содержащая:
первый ауксетический слой, определяющий множество первых отверстий,
выполненных согласно первому рисунку, при этом множество первых отверстий определяет первую пористость;

второй ауксетический слой, определяющий множество вторых отверстий,
выполненных согласно второму рисунку, при этом множество вторых отверстий определяет вторую пористость;

20 третий ауксетический слой, определяющий множество третьих отверстий,
выполненных согласно третьему рисунку, при этом множество третьих отверстий определяет третью пористость,

при этом третий ауксетический слой покрывает второй ауксетический слой так, что множество третьих отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество вторых отверстий,

второй ауксетический слой покрывает первый ауксетический слой так, что множество вторых отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество первых отверстий,

третий ауксетический слой связан со вторым ауксетическим слоем множеством соединительных элементов и

30 второй ауксетический слой связан с первым ауксетическим слоем множеством соединительных элементов.

15. Ауксетическая структура по п. 14, в которой множество соединительных элементов, соединяющих третий ауксетический слой и второй ауксетический слой, является теми же соединительными элементами, которые соединяют второй ауксетический слой и первый ауксетический слой.

16. Ауксетическая структура по п. 15, в которой множество соединительных элементов содержит штифты или заклепки, расположенные в находящиеся одна над другой центральных точках элементарных ячеек первого слоя и второго слоя, при этом направления поворота элементарной ячейки первого слоя и элементарной ячейки второго слоя при нагрузке противоположны.

17. Ауксетическая структура по п. 16, в которой множество соединительных элементов содержит штифты или заклепки, расположенные в находящиеся одна над другой центральных точках элементарных ячеек третьего слоя и второго слоя, при этом направления поворота элементарной ячейки третьего слоя и элементарной ячейки второго слоя при нагрузке противоположны.

18. Ауксетическая структура по п. 14, в которой множество отдельных соединительных элементов содержит сварные соединения, расположенные в находящиеся одна над другой центральных точках элементарных ячеек первого слоя

и второго слоя, при этом направления поворота элементарной ячейки первого слоя и элементарной ячейки второго слоя при нагрузке совпадают.

19. Ауксетическая структура по п. 14, в которой множество отдельных соединительных элементов содержит сварные соединения, расположенные в
5 находящиеся одна над другой центральных точках элементарных ячеек третьего слоя и второго слоя, при этом направления поворота элементарной ячейки третьего слоя и элементарной ячейки второго слоя при нагрузке совпадают.

20. Ауксетическая структура по п. 14, дополнительно содержащая:
10 четвертый ауксетический слой, определяющий множество четвертых отверстий, выполненных согласно четвертому рисунку, при этом множество четвертых отверстий определяет четвертую пористость,

при этом четвертый ауксетический слой покрывает третий ауксетический слой так, что множество четвертых отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество третьих отверстий, и

15 четвертый ауксетический слой связан с третьим ауксетическим слоем множеством соединительных элементов.

21. Ауксетическая структура по п. 20, дополнительно содержащая:
пятый ауксетический слой, определяющий множество пятых отверстий, выполненных
20 согласно пятому рисунку, при этом множество пятых отверстий определяет пятую пористость,

при этом пятый ауксетический слой покрывает четвертый ауксетический слой так, что множество пятых отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество четвертых отверстий, и

25 пятый ауксетический слой связан с четвертым ауксетическим слоем множеством соединительных элементов.

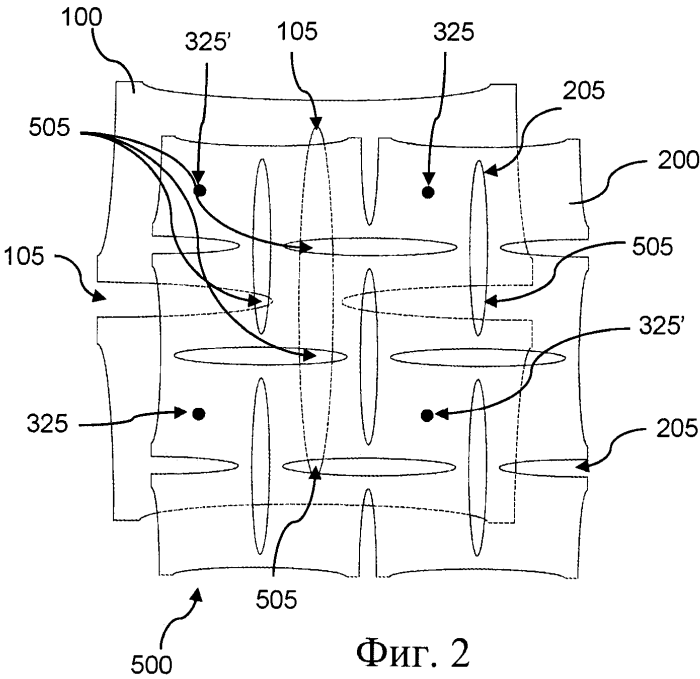
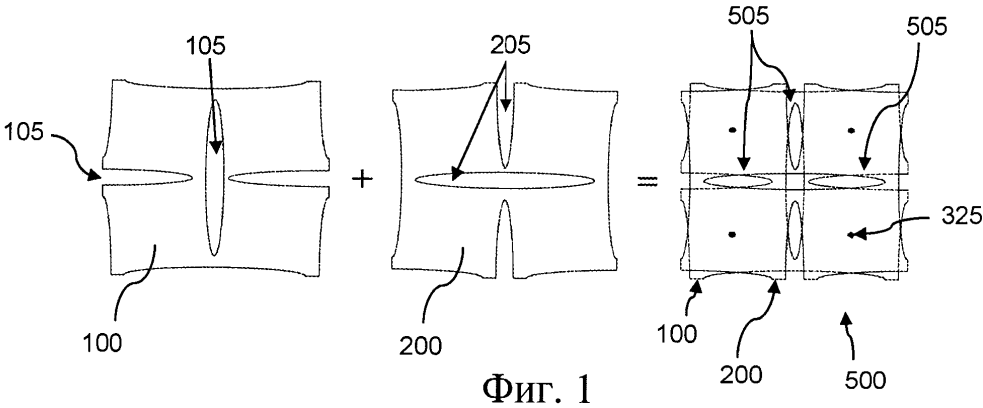
22. Ауксетическая структура по п. 21, дополнительно содержащая:
шестой ауксетический слой, определяющий множество шестых отверстий,
30 выполненных согласно шестому рисунку, при этом множество шестых отверстий определяет шестую пористость,

при этом шестой ауксетический слой покрывает пятый ауксетический слой так, что множество шестых отверстий по меньшей мере частично перекрывает множество пятых отверстий, и

шестой ауксетический слой связан с пятым ауксетическим слоем множеством
35 соединительных элементов.

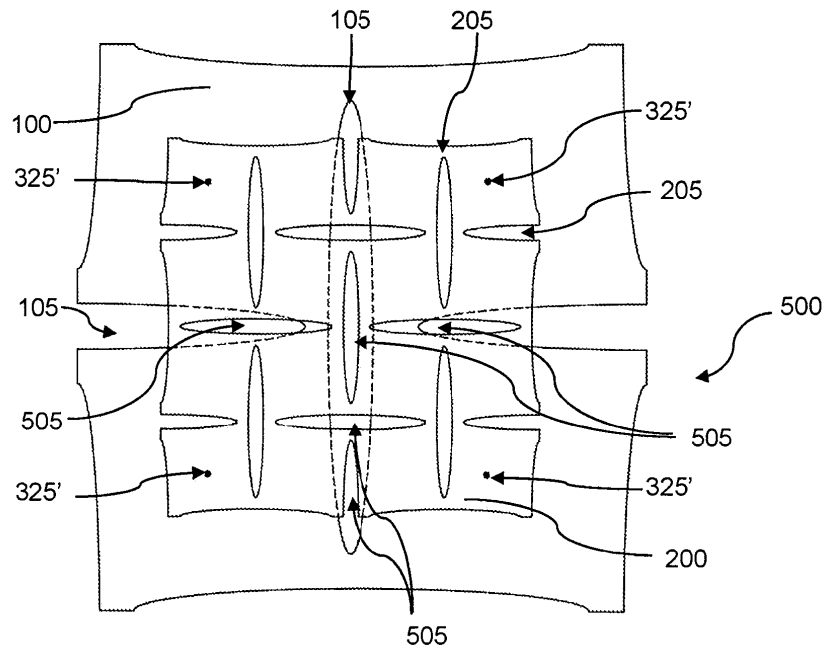
1

1/4

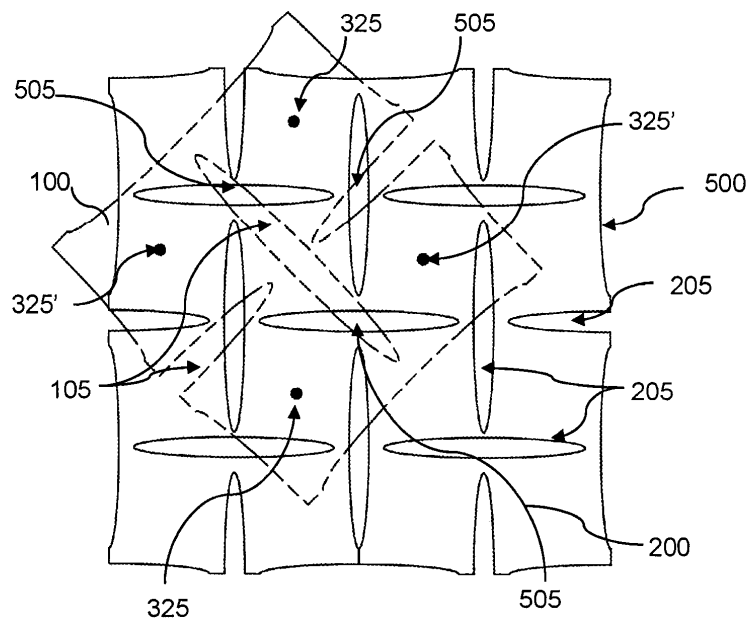


2

2/4

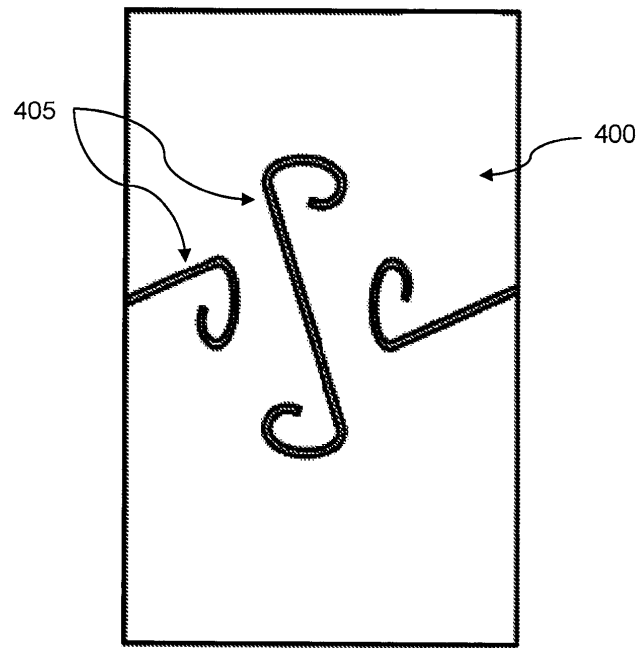


Фиг. 3



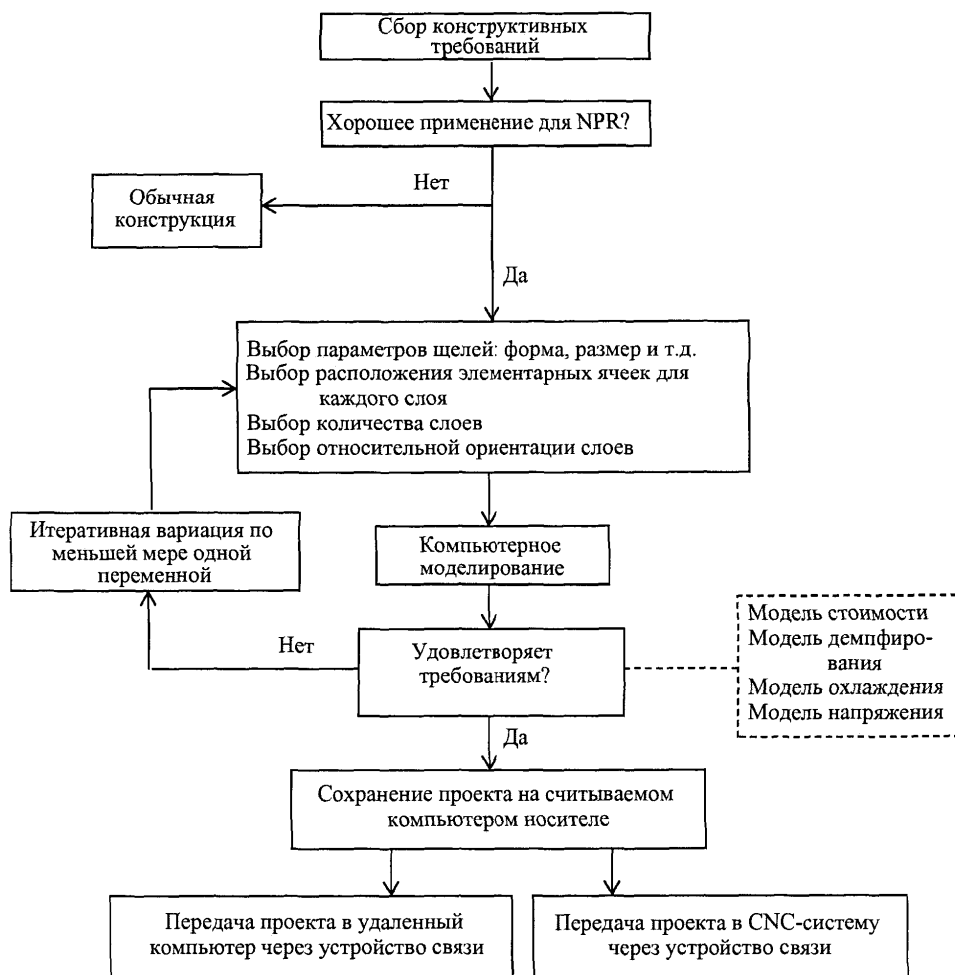
Фиг. 4

3/4



Фиг. 5

4/4



Фиг. 6