

<b>DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO</b>	<b>102021000016562</b>
<b>Data Deposito</b>	<b>24/06/2021</b>
<b>Data Pubblicazione</b>	<b>24/12/2022</b>

Classifiche IPC

<b>Sezione</b>	<b>Classe</b>	<b>Sottoclasse</b>	<b>Gruppo</b>	<b>Sottogruppo</b>
B	29	C	44	34

Titolo

Metamateriale auxetico ad elementi rotanti in titanio o tecnopolimero realizzato mediante stampa 3D



tecnopolimero) pensata per protesi ossee, in particolare vertebrali, progettate su misura del paziente, principalmente in ambito oncologico.

Fratture vertebrali, tumori spinali e  
5 deformità post-traumatiche comportano molto spesso la rimozione del corpo vertebrale danneggiato. La ricostruzione della colonna vertebrale consiste in un'artrodesi spinale, dove un impianto vertebrale, denominato "gabbia", viene inserito dopo una  
10 corpectomia totale in combinazione con un sistema di fissazione secondario. Tecniche di produzione additiva di recente sviluppo consentono la produzione di differenti strutture trabecolari in titanio ad elevata porosità, in grado di assicurare  
15 elevati livelli di fusione ossea e vascolarizzazione.

Il brevetto EP3097145 (*Structured porous metamaterial*) descrive una struttura 3D formata da celle base ripetute nello spazio con cavità  
20 specifiche che permettono di ottenere un coefficiente di Poisson negativo per instabilità elastica.

Il brevetto CN111179894 A (*Adjustable wide band gap auxetic photonic crystal capable of being*  
25 *used for medium-high frequency vibration reduction*)

descrive una struttura chirale formata da cubi collegati tra di essi mediante aste che conferiscono al sistema la proprietà di auxeticità.

Le strutture della tecnica anteriore  
5 presentano diversi inconvenienti.

Il primo luogo mostrano contatti localizzati tra le placche terminali protesiche e le placche terminali vertebrali.

Inoltre, i valori del modulo elastico della  
10 struttura sono molto elevati, aumentando di conseguenza il rischio di ipo-sollecitazione ossea (*stress shielding*) e i fenomeni di subsidenza della struttura.

Scopo della presente invenzione è quello di  
15 superare, almeno in parte, gli inconvenienti lamentati attraverso l'impiego di un'originale struttura porosa per impianti ossei trabecolari, in particolare vertebrali. Detta struttura ha una particolare geometria che le conferisce  
20 l'auxeticità ed un modulo elastico sufficientemente basso da garantire una perfetta osteointegrazione.

Detta struttura, conforme alla rivendicazione 1, è realizzata in metamateriale reticolare, è altamente porosa ed è del tipo ottenuto replicando  
25 nelle tre dimensioni spaziali una cella unitaria

composta da otto elementi rotanti collegati tra loro in modo da avere comportamento auxetico, ed è caratterizzata dal fatto che detti elementi rotanti sono dei cuboidi comprendenti un corpo centrale, di  
5 asse ( $z'$ ), e sei legamenti atti a collegare detti cuboidi con i cuboidi contigui, due di detti legamenti sviluppandosi parallelamente a detto asse ( $z'$ ) e individuando due profondi incavi di ampiezza ( $\alpha$ ), in modo tale che, sollecitando detto cuboide a  
10 compressione, mediante azione su detti legamenti paralleli a detto asse ( $z'$ ), si provoca una rotazione di detto corpo centrale attorno all'asse ( $z'$ ) con conseguente riduzione degli angoli ( $\alpha$ ) e ritrazione degli altri quattro legamenti,  
15 manifestando così comportamento auxetico.

La struttura auxetica secondo l'invenzione può essere vantaggiosamente realizzata in una lega di titanio (ad esempio Ti6Al4V ELI) o in un tecnopolimero ad alte prestazioni (ad esempio PEEK  
20 - *Poly Ether Ether Ketone*) mediante stampa 3D. Questa tecnologia consente di incrementare la durata a fatica dell'impianto in quanto permette di realizzare con relativa facilità specifiche forme/configurazioni dei legamenti che consentono  
25 di ridurre le tensioni e, allo stesso tempo, di

ottenere proprietà meccaniche simili a quelle dell'osso trabecolare umano.

Forme di realizzazione preferite e varianti non banali della presente invenzione formano  
5 l'oggetto delle rivendicazioni dipendenti.

Resta inteso che tutte le rivendicazioni allegare formano parte integrante della presente descrizione.

Il trovato risolve gli inconvenienti in  
10 questione in quanto, rispetto alle strutture descritte in letteratura, mostra una notevole riduzione delle sollecitazioni puntuali sul sistema poroso ed ha eccellenti proprietà elastiche in  
combinazione con una buona facilità di  
15 realizzazione.

Risulterà immediatamente ovvio che si potranno apportare a quanto descritto innumerevoli varianti e modifiche (per esempio relative a forma, dimensioni, disposizioni e parti con funzionalità  
20 equivalenti) senza discostarsi dal campo di protezione dell'invenzione, come appare dalle rivendicazioni allegare.

La presente invenzione verrà meglio descritta da alcune forme preferite di realizzazione, fornite  
25 a titolo esemplificativo e non limitativo, con

riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la FIG. 1 mostra una cella unitaria rappresentativa di una struttura auxetica di tipo noto;
- 5 - la FIG. 2 mostra una struttura auxetica ottenuta replicando nelle tre direzioni spaziali detta cella unitaria;
- le FIGG. 3 e 4 mostrano un cuboide auxetico secondo l'invenzione;
- 10 - la FIG. 5 mostra una cella unitaria rappresentativa di una struttura auxetica secondo l'invenzione;
- la FIG. 6 mostra una struttura auxetica secondo l'invenzione.

15 Con riferimento alla FIG. 1, con (1) è indicata una cella unitaria rappresentativa di una struttura auxetica di tipo noto. Detta cella (1) comprende otto prismi (2); nello specifico, ogni prisma (2) della cella unitaria (1) è connesso agli  
20 altri prismi (2) attraverso il contatto tra gli spigoli e i vertici di detti prismi (2), che fungono da cerniere.

Sollecitando a compressione la struttura auxetica (1), come indicato dalle frecce orientate  
25 secondo l'asse (y), i prismi (2) ruotano nel verso

indicato dalle frecce curve e i bordi esterni dei prismi (2) si spostano verso il centro della struttura (1), come indicato dalle frecce a trattini. Quello appena descritto è un  
5 comportamento auxetico, in quanto a seguito di una sollecitazione di compressione, si ha una contrazione laterale della struttura (1) stessa, cioè la cella (1) si comporta come un corpo solido auxetico.

10 Replicando nelle tre direzioni spaziali la cella unitaria rappresentativa (1), si ottiene una struttura (3) (FIG. 2) che ha proprietà auxetiche; in altre parole, detta struttura (3) ha un coefficiente di Poisson negativo.

15 Trattandosi di struttura nota, non verrà descritta ulteriormente.

Secondo la presente invenzione, i prismi (2) sono sostituiti da cuboidi (20), mostrati in FIG. 3 e in tre viste ortogonali nella FIG. 4, aventi essi  
20 stessi la proprietà dell'auxeticità. Otto cuboidi (20), collegati tra loro formano una cella unitaria rappresentativa (30) (FIG. 5); dette celle (30), replicate nelle tre dimensioni spaziali, formano una struttura auxetica (40) secondo l'invenzione  
25 (FIG. 6).

Con riferimento alle FIGG. 3 e 4, un cuboide (20) comprende un corpo centrale (21), di asse ( $z'$ ), sei legamenti (22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f), atti a collegare detti cuboidi con i cuboidi  
5 contigui, due di detti legamenti (22e, 22f) sviluppandosi parallelamente a detto asse ( $z'$ ) e individuando un profondo incavo di ampiezza ( $\alpha$ ).

Secondo una forma preferita di attuazione detto angolo  $\alpha$  è compreso tra  $5^\circ$  e  $90^\circ$ .

10 La proprietà dell'auxeticità è conferita al cuboide (20) dalla sua forma in quanto, sollecitando il cuboide (20) a compressione lungo un asse parallelo all'asse ( $y$ ), si provoca una rotazione di detto corpo centrale (21) attorno a  
15 detto asse ( $z'$ ), rappresentata dalla freccia curva ( $f_2$ ), con conseguente riduzione degli angoli ( $\alpha$ ) e ritrazione dei legamenti (22a, 22b, 22c, 22d). Nelle FIGG. 3 e 4 detta sollecitazione di compressione, è rappresentata dal sistema di forze  
20 ( $F_1/-F_1$ ), orientate secondo l'asse ( $y$ ), che agiscono rispettivamente sui legamenti (22e) e (22f). A seguito di detta rotazione del corpo centrale (21), si verifica una ritrazione in direzione ( $x$ ) dei due legamenti (22b) e (22d),  
25 rappresentata dalle frecce ( $f_3/-f_3$ ), e in direzione

(z) dei rimanenti due legamenti (22a, 22c),  
rappresentata dalle frecce (f4/-f4) .

In FIG. 4, detto cuboide (20) è mostrato in  
tre viste ortogonali e la sollecitazione di  
5 compressione è in direzione dell'asse (y)  
[coincidente con l'asse (y')]. Con riferimento alle  
FIGG. 3 e 4, poiché l'asse (z') è inclinato  
rispetto all'asse (x) di un angolo ( $\beta$ ), in generale  
diverso da  $45^\circ$ , e poiché il corpo centrale (21) del  
10 cuboide (20) è inclinato rispetto al piano (x-z) di  
un angolo ( $\Phi$ ), in generale diverso da  $0^\circ$ , il  
coefficiente di Poisson secondo l'asse (x) sarà  
diverso dal coefficiente di Poisson secondo l'asse  
(z), ancorché entrambi negativi.

15 Detti angoli ( $\beta$ ) e ( $\Phi$ ) possono assumere un  
valore compreso tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

Secondo una forma preferita di attuazione, su  
detto corpo centrale (21) è realizzato un foro (23)  
di asse (z'), allo scopo di ridurre la rigidezza e  
20 il peso del cuboide (20) e di aumentare la porosità  
della struttura (40).

La struttura descritta, se realizzata in lega  
di titanio tramite la tecnica di stampa 3D SLM,  
permette in particolare di:

25 - ottenere una rigidezza molto simile a quella

della vertebra umana, grazie al comportamento auxetico ed alla specifica conformazione dei legamenti che connettono i cuboidi rotanti (20);

- ottenere una maggiore resistenza meccanica statica ed a fatica rispetto alle protesi note, grazie alla specifica conformazione geometrica;
- rendere possibile una più uniforme distribuzione dello stato di sollecitazione all'interfaccia con il tratto vertebrale sano contiguo all'impianto, evitando fenomeni di "stress-shielding"/ipo-sollecitazione e quindi la conseguente degenerazione minerale ossea;
- ridurre il rischio di eventuali collassi o cedimenti improvvisi delle vertebre adiacenti;
- accrescere il tasso di integrazione ossea, simulando la configurazione caratteristica dell'osso spugnoso vertebrale;
- ridurre eventuali fenomeni di subsidenza del sistema (protesi) rispetto alla sua sede naturale di impianto;
- ridurre il rischio di interferenze della protesi con il midollo spinale grazie al comportamento auxetico.

La complessità geometrica della struttura comporta che possa essere realizzata solo mediante

stampa 3D ed in particolare, al fine di rendere minime le dimensioni caratteristiche dei legamenti massimizzando le proprietà elastiche del sistema, mediante la tecnologia di fusione laser (SLM).

5           In alternativa detta struttura può essere realizzata anche tramite stampanti FFF (*Fused Filament Fabrication*), e FDM (*Fused Deposition Modeling*) e SLS (*Selective Laser Sintering*).

I risultati sperimentali confermano le  
10 previsioni numeriche in termini di coefficiente di Poisson e caratteristiche meccaniche.

La struttura (40) secondo l'invenzione è in grado di sopportare carichi di compressione molto elevati e di rimanere elastica fino a deformazioni  
15 pari a circa il 3%, con una rigidezza simile a quella delle ossa vertebrali trabecolari umane.

Inoltre, tale struttura porosa permette di:

- diminuire i fattori di concentrazione di tensione lungo il corpo trabecolare;
- 20 - aumentare la vita a fatica dell'impianto protesico;
- ridurre la rigidezza dell'intera protesi;
- evitare contatti con i tessuti adiacenti sani (ad esempio il midollo spinale).

25           Si sono descritte delle forme preferite di

attuazione dell'invenzione, ma naturalmente esse sono suscettibili di ulteriori modifiche e varianti nell'ambito della medesima idea inventiva. In particolare, agli esperti nel ramo risulteranno  
5 immediatamente evidenti numerose varianti e modifiche, funzionalmente equivalenti alle precedenti, che ricadono nel campo di protezione dell'invenzione, come evidenziato nelle rivendicazioni allegate nelle quali i segni di  
10 riferimento posti tra parentesi non possono essere interpretati nel senso di limitare le rivendicazioni stesse. Inoltre, la parola "comprendente" non esclude la presenza di elementi e/o fasi diversi da quelli elencati nelle  
15 rivendicazioni. L'articolo "un", "uno" o "una" precedente un elemento non esclude la presenza di una pluralità di tali elementi. Il semplice fatto che alcune caratteristiche siano citate in rivendicazioni dipendenti diverse tra loro non  
20 indica che una combinazione di queste caratteristiche non possa essere vantaggiosamente utilizzata.

## RIVENDICAZIONI

1. Struttura auxetica (40) in metamateriale reticolare, altamente porosa, del tipo ottenuto replicando nelle tre dimensioni spaziali una cella unitaria (30) composta da otto elementi rotanti (20) collegati tra loro in modo da avere comportamento auxetico, caratterizzata dal fatto che detti elementi rotanti sono dei cuboidi (20) comprendenti un corpo centrale (21), di asse ( $z'$ ) e sei legamenti (22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f) atti a collegare detti cuboidi (20) con i cuboidi (20) contigui, due di detti legamenti (22e, 22f) sviluppandosi parallelamente a detto asse ( $z'$ ) e individuando due profondi incavi di ampiezza ( $\alpha$ ), in modo tale che, sollecitando detto cuboide (20) a compressione, mediante azione su detti legamenti (22e, 22f) paralleli a detto asse ( $z'$ ), si provoca una rotazione di detto corpo centrale (21) attorno all'asse ( $z'$ ) con conseguente riduzione degli angoli ( $\alpha$ ) e ritrazione degli altri quattro legamenti (22a, 22b, 22c, 22d), manifestando così comportamento auxetico.

2. Struttura auxetica (40), secondo la rivendicazione 1, caratterizzata dal fatto che su detto corpo centrale (21) è realizzato un foro (23)

di asse ( $z'$ ), in modo da ridurre la rigidezza e il peso del cuboide (20) e di aumentare la porosità della struttura (40).

3. Struttura auxetica (40), secondo la  
5 rivendicazione 1 o 2, caratterizzata dal fatto che detto angolo ( $\alpha$ ) ha un valore compreso fra  $5^\circ$  e  $90^\circ$ .

4. Struttura auxetica (40), secondo almeno una  
delle rivendicazioni da 1 a 3, caratterizzata dal  
10 fatto che l'asse ( $z'$ ) di detto cuboide (20) è orientato di un angolo ( $\beta$ ) rispetto ad un asse ( $x$ ) e di un angolo ( $\Phi$ ) rispetto ad un piano ( $x-z$ ), in cui detto asse ( $x$ ) e detto piano ( $x-z$ ) fanno parte di un sistema di riferimento ( $x, y, z$ ) di detta  
15 struttura auxetica (40).

5. Struttura auxetica (40), secondo la rivendicazione 4, caratterizzata dal fatto che detti angoli ( $\beta$ ) e ( $\Phi$ ) possono assumere un valore compreso tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

20 6. Struttura auxetica (40), secondo almeno una delle rivendicazioni da 1 a 5, caratterizzata dal fatto di essere realizzata in una lega di titanio.

7. Struttura auxetica (40), secondo la rivendicazione 6, caratterizzata dal fatto che  
25 detta lega di titanio è Ti6Al4V ELI.

8. Struttura auxetica (40), secondo almeno una delle rivendicazioni da 1 a 7, caratterizzata dal fatto di essere realizzata in tecnopolimero.

9. Struttura auxetica (40), secondo la  
5 rivendicazione 8, caratterizzata dal fatto che detto tecnopolimero è PEEK (*Poly Ether Ether Ketone*).

10. Struttura auxetica (40), secondo almeno una delle rivendicazioni da 1 a 9, caratterizzata dal  
10 fatto di essere realizzata mediante stampa 3D.

11- Struttura auxetica (40), secondo la rivendicazione 10, caratterizzata dal fatto che detta stampa 3D comprende le tecnologie di fusione laser (SLM), le stampe FFF (*Fused Filament  
15 Fabrication*), FDM (*Fused Deposition Modeling*) e SLS (*Selective Laser Sintering*).

1/6

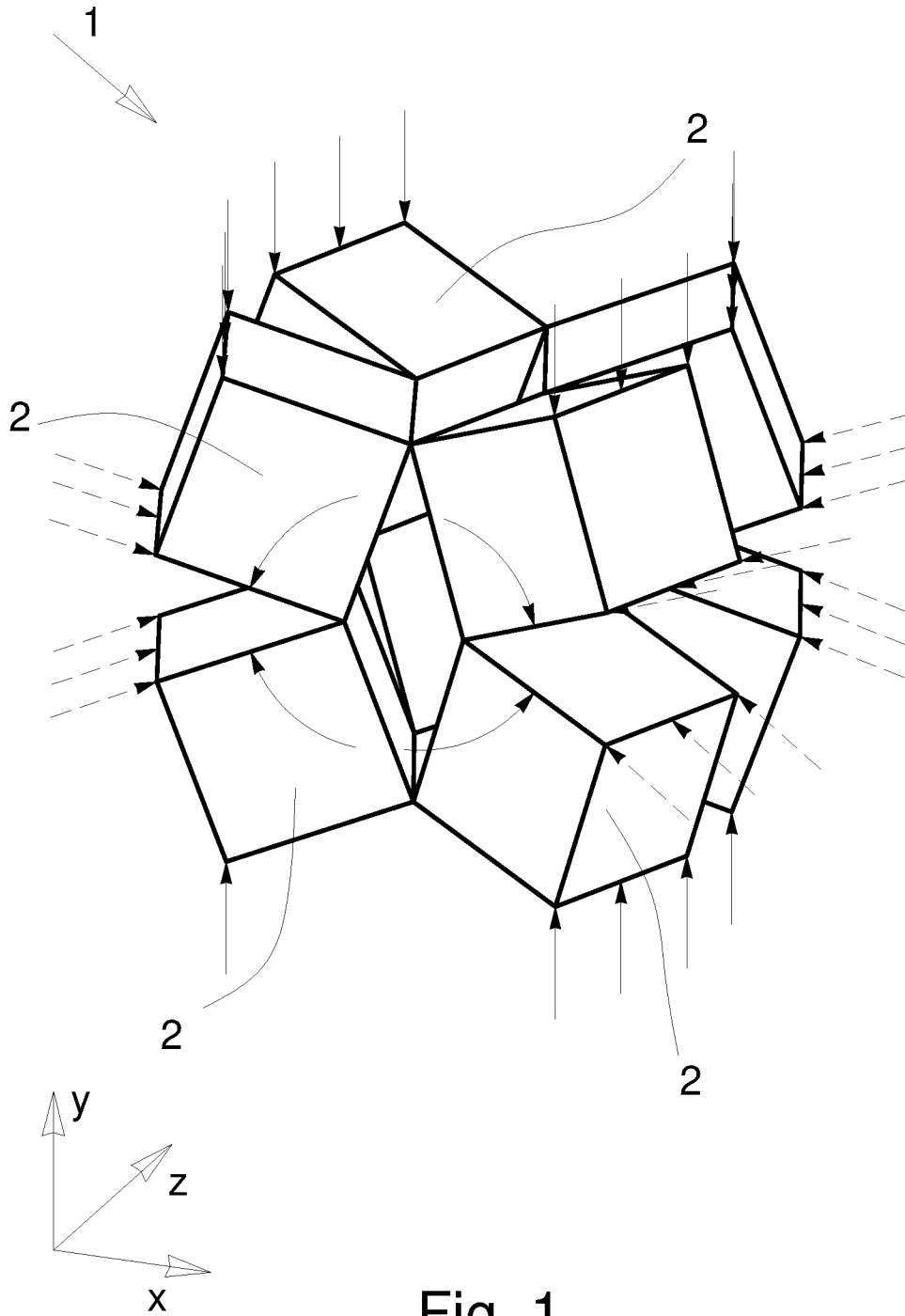


Fig. 1

2/6

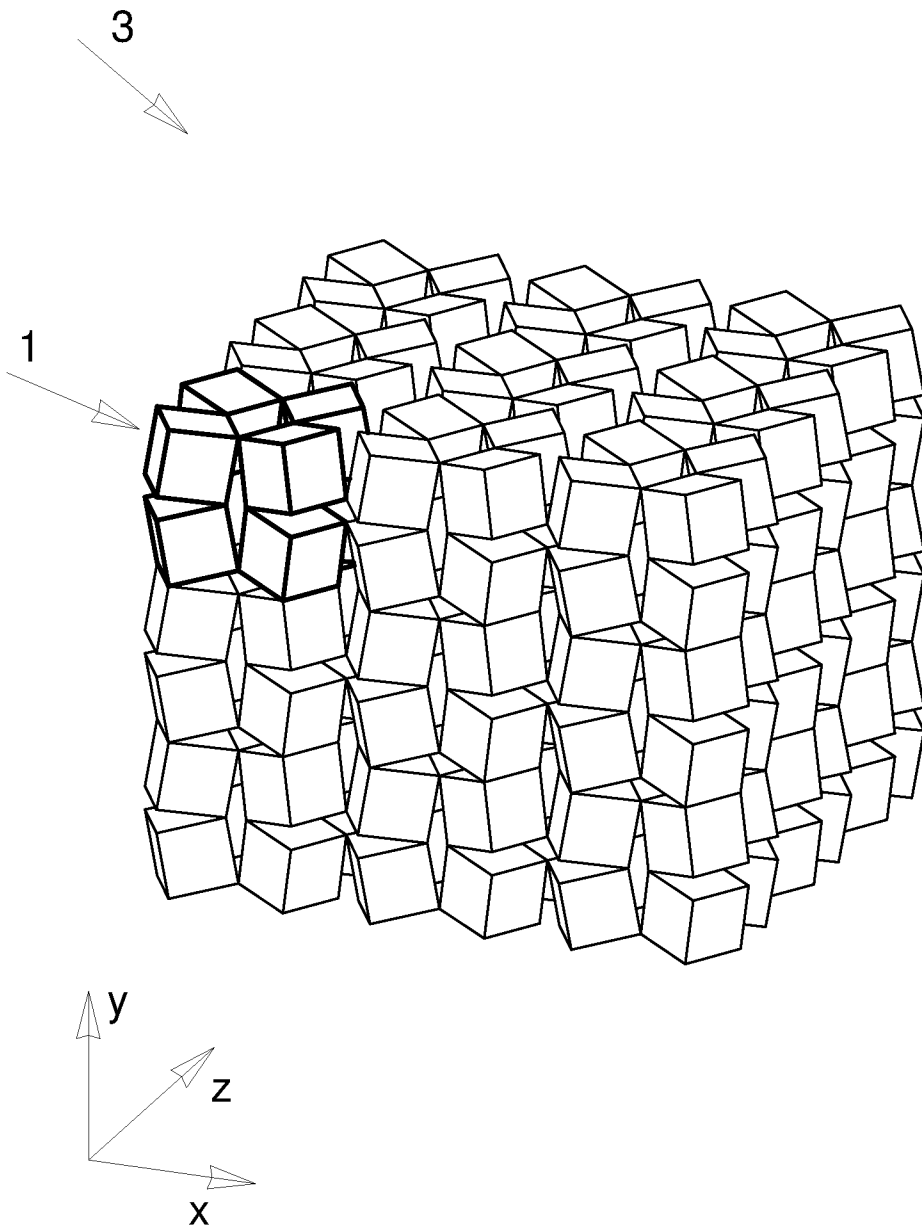


Fig. 2

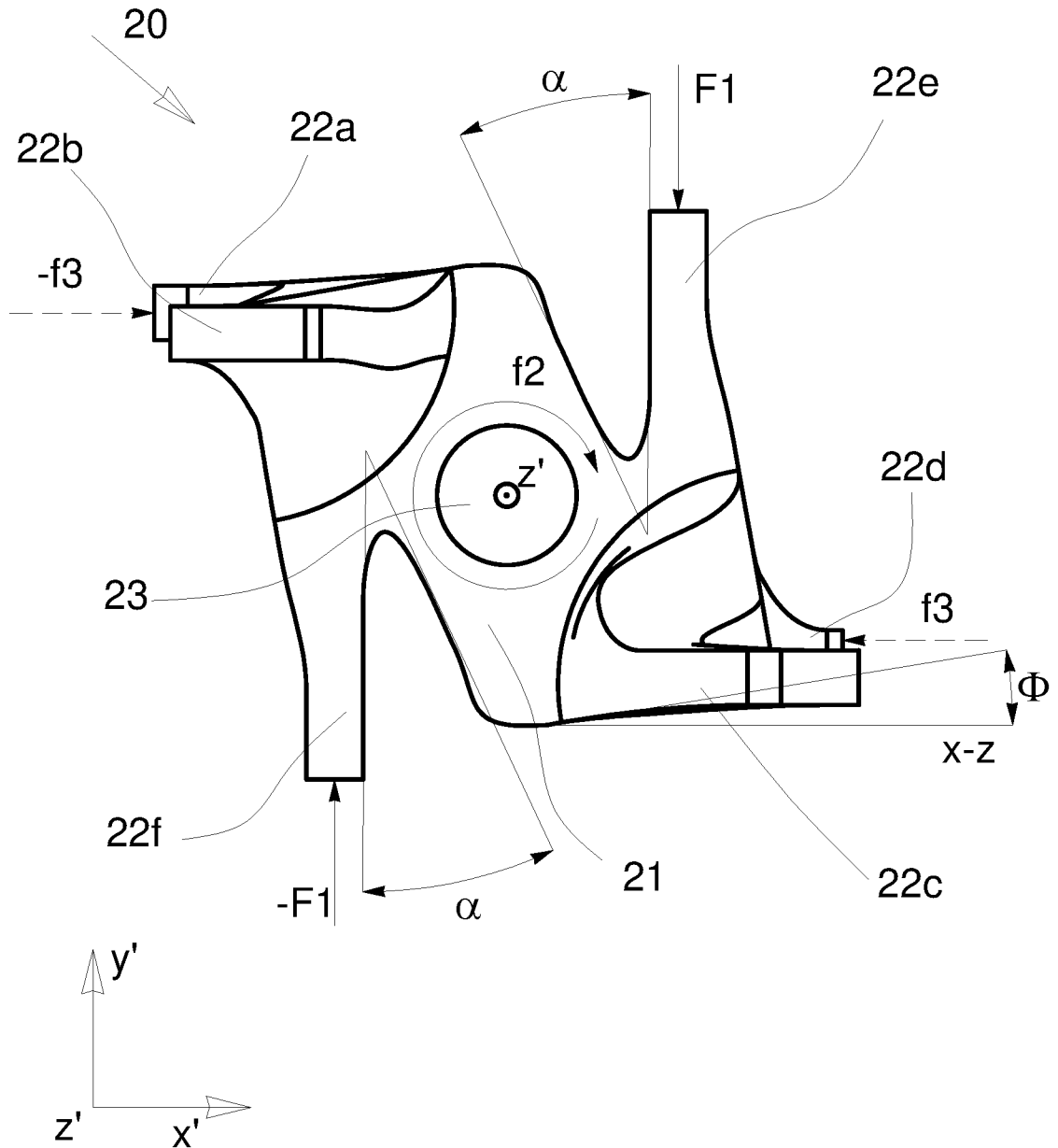


Fig. 3

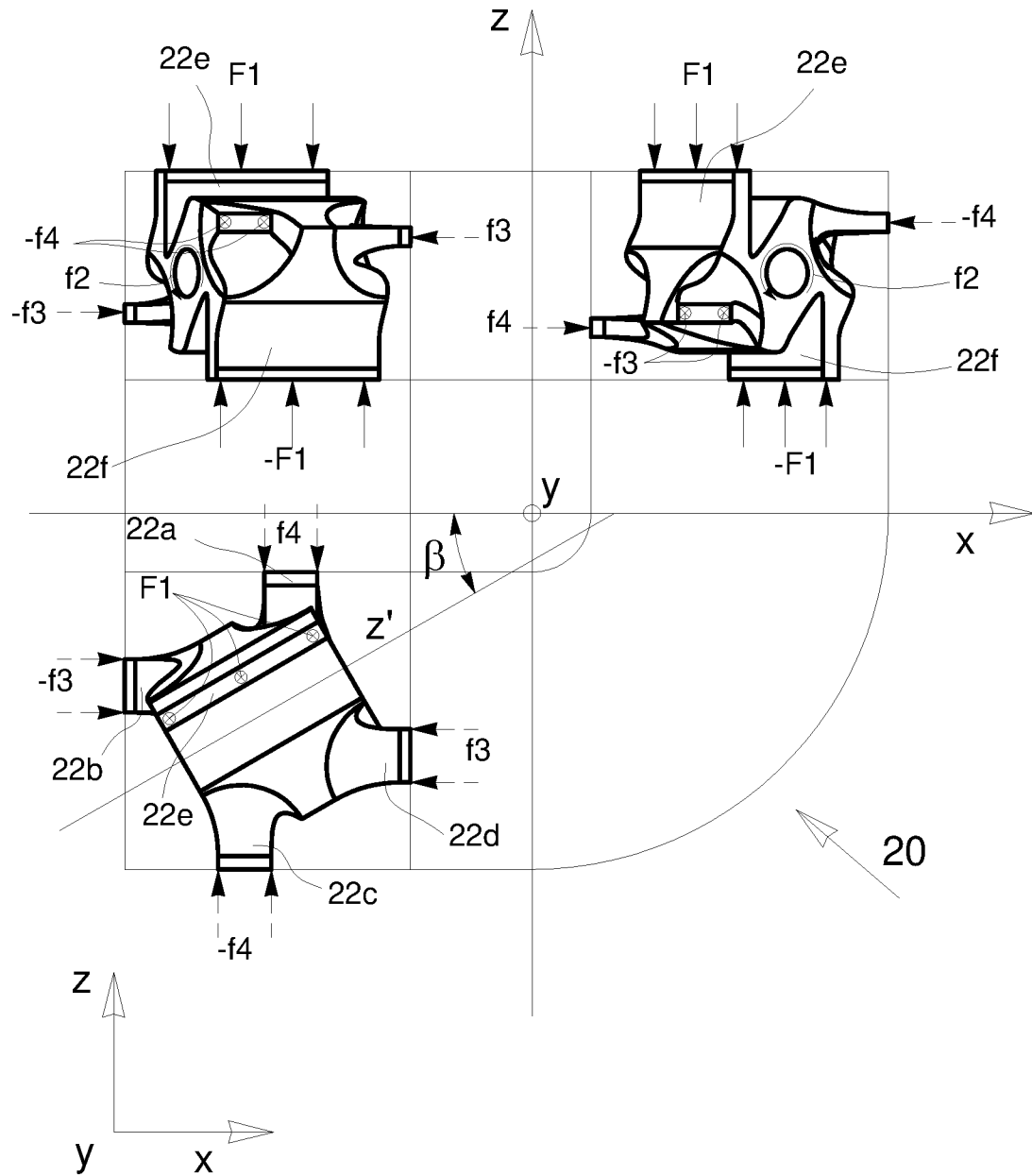


Fig. 4

5/6

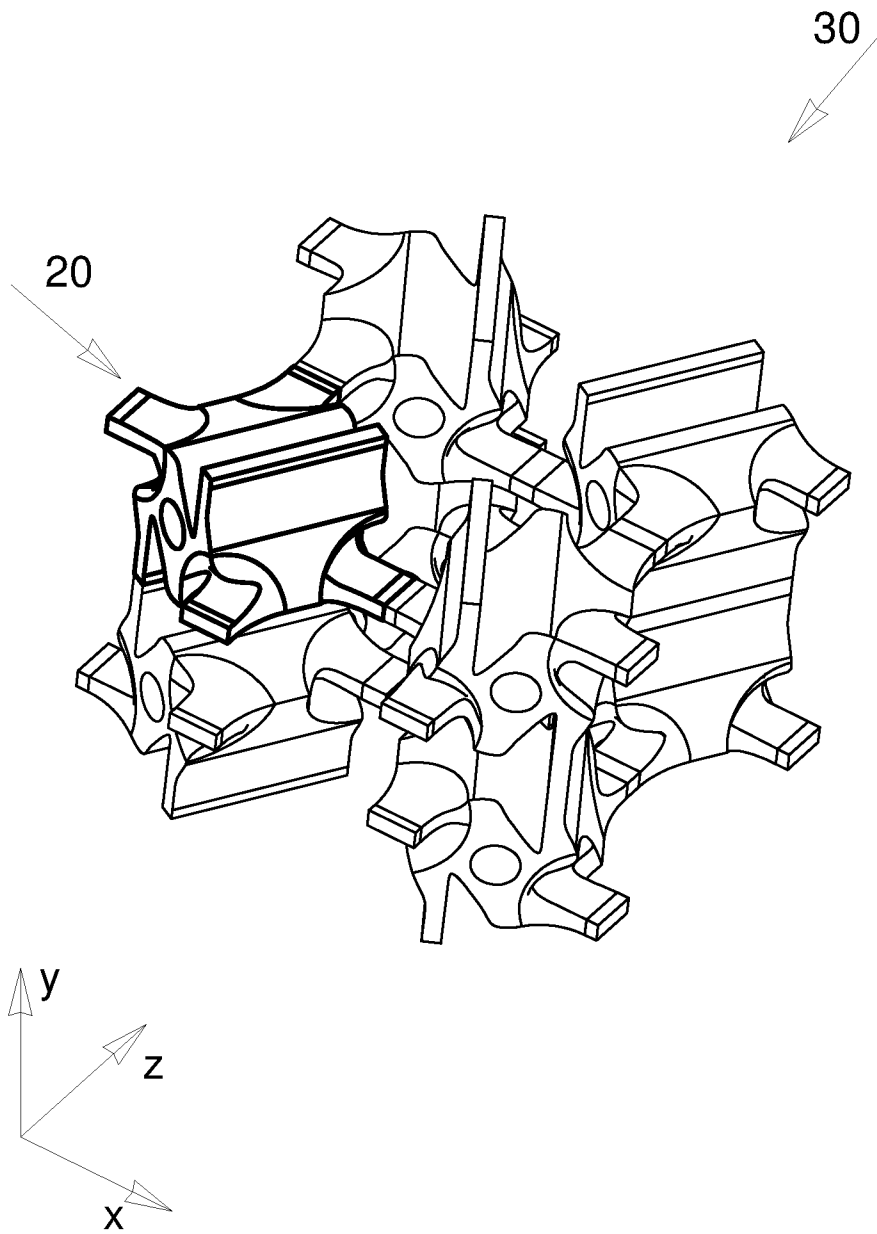


Fig. 5

6/6

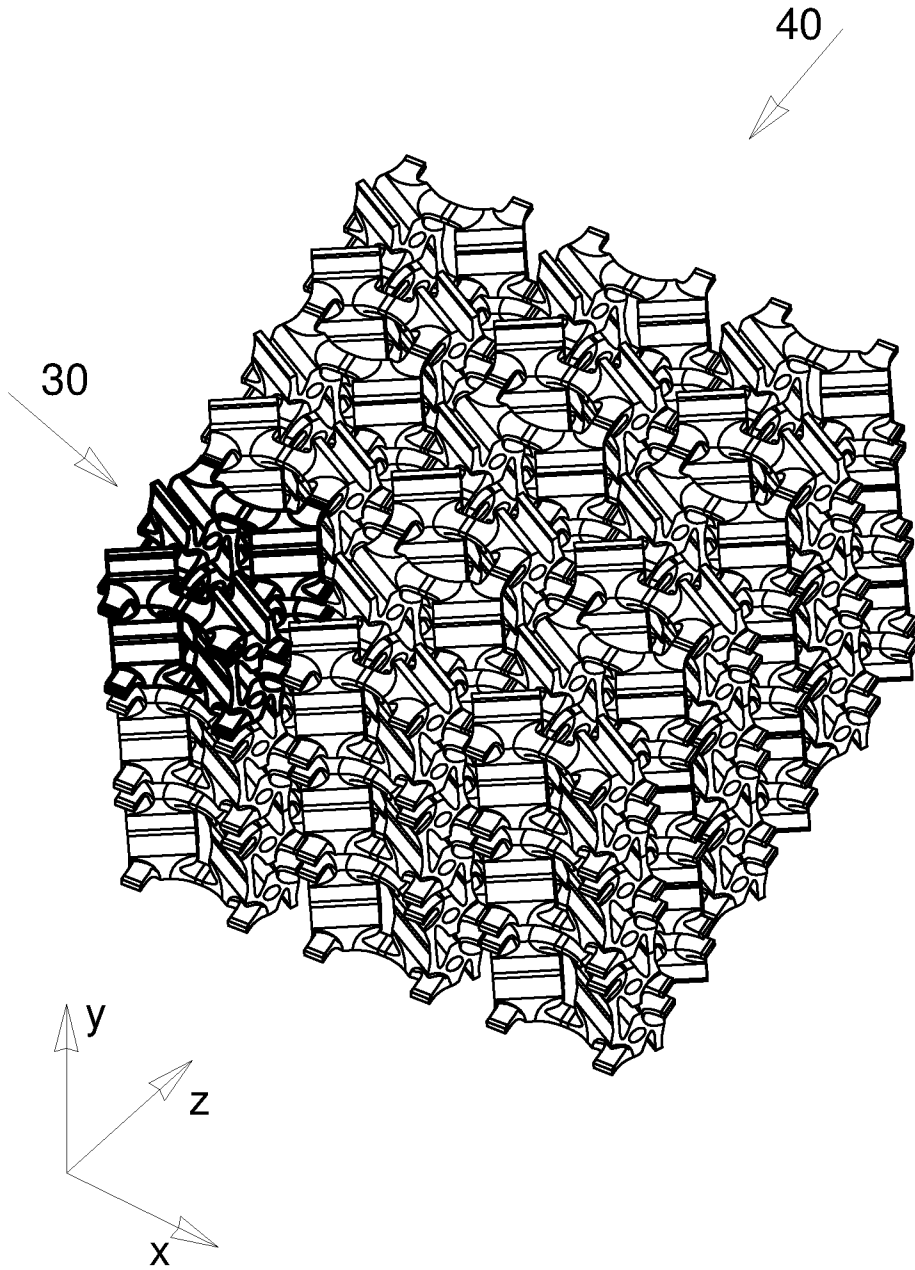


Fig. 6