



Zusammengesetzte Schichtstrukturen mit topologischer Verzahnung von "Bausteinen" – ein neues Konzept im Werkstoffdesign

Prof. Dr. Juri Estrin, Clausthal-Zellerfeld;
Prof. Dr. Arcady Dyskin, Perth;
Dr. Alexei Kanel-Belov, Moskau;
Dipl.-Math. Elena Pasternak, Perth

Zusammenfassung

Es wird ein neues Konzept für Design von Strukturen sowie Werkstoffverbunden vorgeschlagen, welches auf dem Prinzip von topologischer Selbstverzahnung von "Bausteinen" basiert. Ausgehend von der Implementierung dieses Konzepts in einer Schicht von in sich verzahnten tetraederförmigen Elementen wird eine Reihe weiterer geometrischer Formen präsentiert, bei denen topologische Selbstverzahnung möglich ist. Auf Anordnungen aus tetraederförmigen „Bausteinen“, die eine Reihe von attraktiven Eigenschaften besitzt, wie z. B. hohe Toleranz zu Fehlstellen, wird im Detail eingegangen. Abschließend wird das Anwendungspotential des Prinzips der topologischen Selbstverzahnung erörtert.

1. EINLEITUNG

In unserer jüngsten Publikation /1/ wurde eine neue Architektur von Strukturen vorgeschlagen, die auf einer regelmäßigen Anordnung von in sich verzahnten Elementen basiert. Es ist uns gelungen, durch die geeignete Wahl der geometrischen Form der Elemente sowie deren Packung zu einer

zusammengesetzten Struktur das Prinzip der *topologischen Selbstverzahnung* zu realisieren, bei der kein einziges Element aus der Struktur herausbrechen kann, da es durch seine Nachbarn „arretiert“ ist. Wir sind der Meinung, dass dieses Prinzip eine neue Richtung im Design von Strukturen, aber auch von Materialverbunden mit besonderen Kombinationen von mechanischen und physikalischen Eigenschaften, eröffnet. Daher ist diese Tagung für uns eine willkommene Gelegenheit, das neue Konzept einem breiten Kreis von Ingenieuren und Forschern vorzustellen.

Die Idee der Verzahnung von „Bausteinen“ i. a. ist natürlich nicht ganz neu. So spricht man im Bauwesen von „Interlocking Bricks“ /2/. Dabei wird Selbstverzahnung jedoch durch Verbindungselemente (etwa nach dem Lego-Prinzip) erreicht, was zu unerwünschten Spannungsspitzen an den Verbindungsstellen führt. Bei der von uns vorgeschlagenen Topologie hingegen tragen sich die Elemente wechselseitig, und zwar frei von Spannungsspitzen. Lediglich in Randbereichen ist ein Ausbrechen möglich. Daher muß die aus diesen Elementen zusammengesetzte Struktur von einem festen Rahmen umschlossen werden. Eine „Prototyp“-Struktur dieser Art auf der Basis von tetraederförmigen Elementen wurde von uns auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Abschnitt 2 diskutiert. Abschnitt 3 ist weiteren Strukturen gewidmet, denen andere Geometrien der „Bausteine“ zugrunde liegen. Schließlich werden in Abschnitt 4 Anwendungsmöglichkeiten des neuen Konzepts diskutiert.

2.1. Topologische Aspekte

Die tetraederbasierte Struktur ist in Abb. 1 dargestellt. Die Anordnung von Tetraedern, welche die Selbstverzahnung gewährleistet, wird in Abb. 1a veranschaulicht. Ein entsprechendes physikalisches Modell einer zusammengesetzten Struktur ist in Abb. 1b präsentiert. Hier ist auch eine Fehlstelle (ein fehlendes Tetraeder) zu sehen (weiße Markierung), welche weiter unten noch diskutiert wird. Schnittebenen A-A und B-B sollen illustrieren, dass jedes Tetraeder durch seine Nachbarn unverrückbar gesperrt ist. Während alle planaren Elemente 1 bis 7 in der Ebene A-A ohne Behinderung durch die Nachbarn senkrecht verschoben werden können, ist es in der Parallel-Ebene B-B nicht der Fall: hier wird jedes der Elemente 1-7 durch die Nachbarn festgehalten. Das hat zur Folge, dass die dreidimensionalen tetraedrischen Elemente ebenfalls gesperrt sind. Es können lediglich jene Blocks bewegt werden, die sich an der Peripherie eines Ensembles aus Tetraedern befinden. Werden diese nun fixiert (etwa durch Einspannung in einen äußeren Rahmen), so wird dadurch die gesamte Struktur stabilisiert.

2.2. Verformung einer zusammengesetzten Struktur

Die mechanischen Eigenschaften einer solchen Struktur wurden an Proben getestet, die aus je 100 Al-Tetraedern mit der Kantenlänge von 1 cm bestanden. Um die Randelemente zu fixieren, wurden sie von einem festgezogenen äußeren Stahlrahmen zusammengehalten. Bei den mechanischen Prüfungen in einer Instron-Maschine wurde die Last über einen Indentor (1 cm im Durchmesser) aufgebracht (Abb. 2). Der

Versuch wurde unterbrochen, wenn die an den Indentor angrenzenden Tetraeder, die bei der Belastung eine Rotation erfuhren, den Indentor berührten. Die gemessene Abhängigkeit der Last von der Verschiebung des Indentors (bzw. von der maximalen Durchbiegung der Probe) ist in Abb. 3 zu sehen.

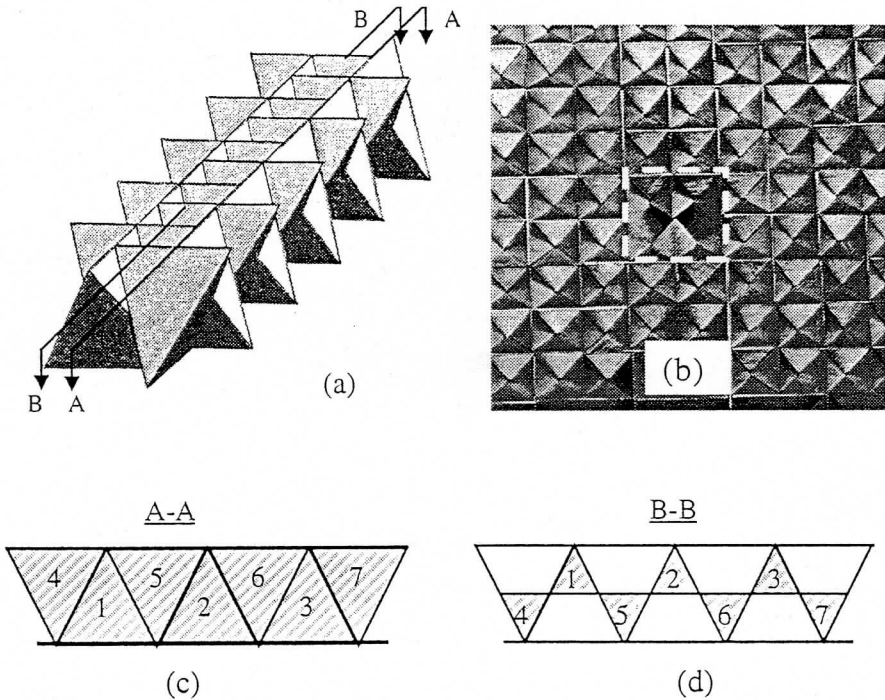


Abb. 1. Tetraederbasierte Struktur:

- (a) schematische Darstellung;
- (b) zusammengesetzte Struktur mit einer Fehlstelle;
- (c) Schnittebene A-A; (d) Schnittebene B-B.

Die Kurve zeigt zwei deutlich unterschiedliche Verformungsstufen: einem nichtlinearen elastischen Teil folgt ein scheinbar plastischer Bereich. Die nach der Entlastung gemessene bleibende Verformung der Struktur ist beträchtlich, obwohl die einzelnen Tetraeder – selbst im Bereich des kuppelförmigen Eindruckes des Indentors - praktisch unverformt bleiben. Daraus kann man schließen, dass es sich dabei um einen

kollektiven Effekt und nicht um plastische Verformung einzelner Elemente handelt. Die Lasttragbarkeit der zusammengesetzten Struktur (mindestens 1,4 kN in unseren Versuchen) ist als recht beachtlich anzusehen. Diese Größe kann durch die lateralen Kräfte seitens des Einspannrahmens gesteuert werden. Interessant ist die Beobachtung, dass durch die zusätzlichen Rotationsfreiheitsgrade der Elemente, die dazu führen, dass sie den Indentor berühren, der Widerstand der Struktur gegen Perforation (beispielsweise durch ein Projektil) erhöht wird.

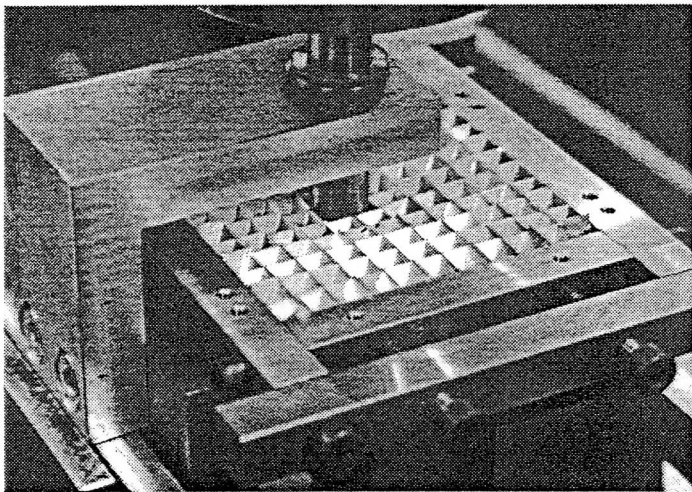


Abb. 2. Eine aus tetraederförmigen Bausteinen zusammengesetzte Struktur in einem mechanischen Test (nach /1/)

Durch vergleichende Versuche wurde ferner festgestellt, dass die Biegesteifigkeit der zusammengesetzten Struktur fast um eine Zehnerpotenz geringer ist, als die der massiven Platte gleicher Dicke. Diese Ergebnisse zeigen also, dass die neuartigen Schichtstrukturen neben einer guten Umformbarkeit auch eine hohe Biegeflexibilität besitzen.

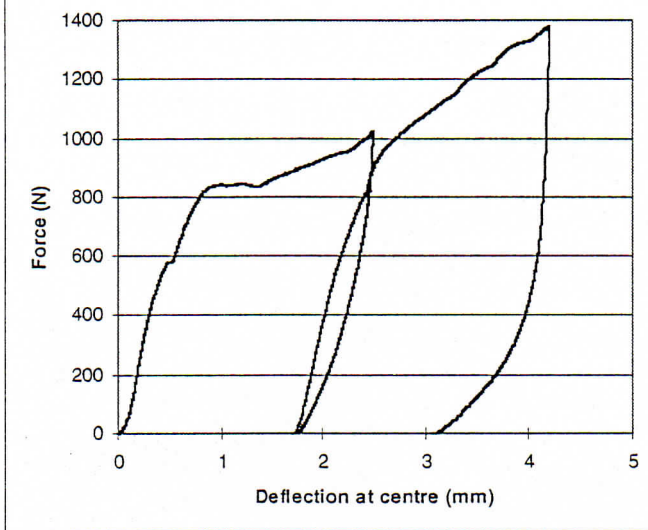


Abb. 3. Last-Indentorverschiebungskurve (Be- und Entlastung) der zusammengesetzten Struktur (nach [1/]).

2.3. Brucheigenschaften

Besonders interessant ist die Möglichkeit, mit selbstverzahnten Strukturen hohe Bruchzähigkeiten zu erzielen. Dies ist wie folgt zu erklären. Die aus Tetraedern zusammengesetzte Struktur ist tolerant zu einzelnen Fehlstellen. Ein fehlendes (oder versagtes) Tetraeder, wie es in Abb. 1b dargestellt ist, führt nicht zum Verlust der Stabilität der Struktur (auch lokal nicht). Ferner wird die Ausbreitung eines Risses von einem Tetraeder zum nächsten dadurch verhindert, dass sie nicht miteinander verbunden sind. Dieser auf Cook und Gordon zurückgehende Mechanismus der Verzögerung von Rissausbreitung [3/], wird in Abb. 4 veranschaulicht. Rissausbreitung großer Reichweite wird in unserer zusammengesetzten Struktur also unterdrückt. Geht man nun davon aus, dass eine Akkumulation der Schädigung durch das Versagen einzelner Tetraeder unkorreliert erfolgt und dass die Struktur zusammenbricht, wenn ein durchgehender Fehler (eine zusammenhängende Kette aus versagten

Tetraedern) entstanden ist, so kann man mittels der Perkolationstheorie /4/ feststellen, wie groß der Prozentsatz der versagten Tetraeder ist, bei dem die Perkulationsgrenze erreicht ist. Man kommt dabei auf einverblüffendes Ergebnis: im Grenzfall von einer unendlich großer Anzahl der Elemente toleriert die Struktur bis zu 59% von Fehlstellen! Für Systeme mit einer finiten Anzahl N der Elemente wird diese Perkulationsgrenze zu einer stochastischen Variablen, die um den Wert von 0.59 nahezu normal verteilt ist. Dabei ist die Standardabweichung durch

$$\delta_L \cong N^{-(1/2\nu)}, \quad \nu \approx 1.35 \quad (1)$$

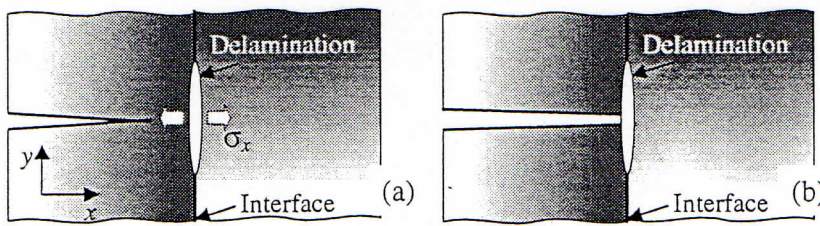


Abb. 4. Der Cook-Gordon-Mechanismus der Verzögerung der Rißausbreitung.

(a) Die Konzentration der in Richtung x wirkenden Spannung σ_x führt zur Öffnung des Spaltes an der Grenzfläche zwischen den benachbarten Elementen. (b) „Sperrung“ des primären Risses durch den sekundären Riss an der Grenzfläche zwischen den Elementen.

gegeben. Daraus ist leicht zu erkennen, dass man für den Fall von genügend großem N mit einem festen Wert der Perkulationsgrenze, nämlich 59%, operieren kann. Unterhalb dieses Schwellenwertes ist die Schicht noch als mechanisch intakt anzusehen. Dieses Ergebnis gibt auch einen Anhaltswert für die zulässige Gewichtsreduktion einer derartigen Schichtstruktur durch *gewollte* unvollständige Packung.

3. WEITERE BEISPIELE TOPOLOGISCHER SELBSTVERZÄHNUNG

Auch wenn die Tetraedergeometrie wohl die einfachste ist, ist sie nicht die einzige, die Selbstverzahnung ermöglicht. Ein Hinweis auf eine Methode /5/, weitere Strukturen aus identischen selbstverzahnten Elementen zu generieren, wird durch Abb. 5 veranschaulicht. In Abb. 5a sind parallele Schnittebenen einer tetraederbasierten Struktur dargestellt. Man stellt sofort fest, dass Tetraeder mit abgeschnittenen „Kuppen“ (Abb. 5b) immer noch die Eigenschaft der Selbstverzahnung besitzen (und sogar noch leichter zusammenzusetzen sind, da sie nicht auf einer Kante, sondern auf einer Fläche in der Horizontalebene ruhen können). Die dabei entstehende Struktur kann man sich als die in Abb. 1a denken, bei der von beiden Seiten Teile „weggefräst“ sind. Ferner stellt man fest, dass die mittlere Schnittebene in Abb. 5a aus aneinander angereihten Quadraten besteht. Ersetzt man diese Basisfigur durch andere symmetrische Figuren, etwa ein Achteck, so kann eine neue Form der in sich verzahnenden Elemente erzeugt werden. Dieses wird in Abb. 6 illustriert, die zwei Schnitte durch eine achteckbasierte Anordnung sowie ein einzelnes Element zeigt. Offensichtlich kann man die Anzahl der Seiten der Basisfigur immer weiter verdoppeln und so neue Geometrien erzeugen bis im Grenzfall eine Anordnung mit einem Kreis als Basisfigur erhalten wird (Abb. 7). Ein Charakteristikum solcher Strukturen ist ihre hohe Porosität und Permeabilität. Verglichen mit einer Struktur aus in sich verzahnten Tetraedern besitzen die hier beschriebenen Strukturen eine niedrigere Festigkeit, da die Kontaktflächen

zwischen den benachbarten Elementen geringer sind als bei den Tetraedern.

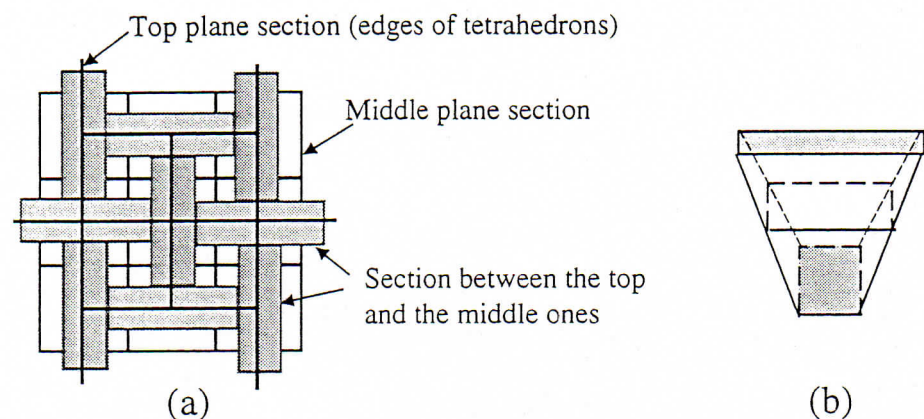


Abb. 5. Anordnungen mit dem Quadrat als Basisfigur.

- (a) Schnittebenen einer Anordnung bestehend aus Tetraedern;
 (b) ein Tetraeder mit abgeschnittenen „Kuppen“.

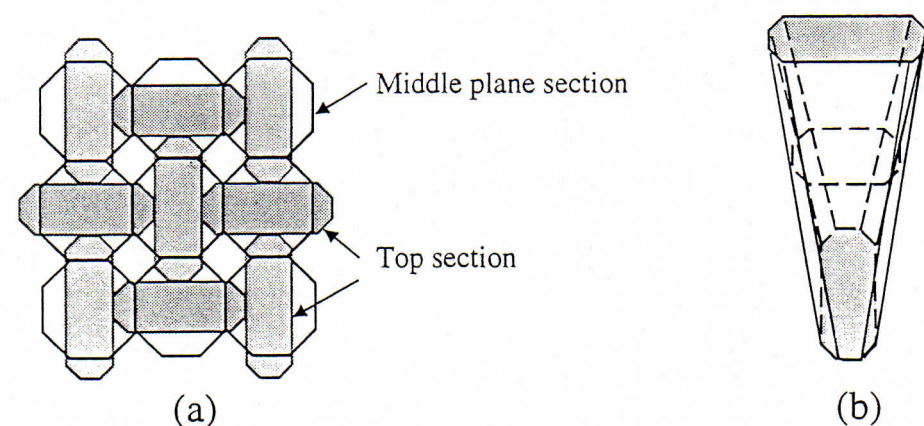


Abb. 6. Anordnung mit einem Achteck als Basisfigur.

- (a) Schnittebenen und (b) ein Einzelelement.

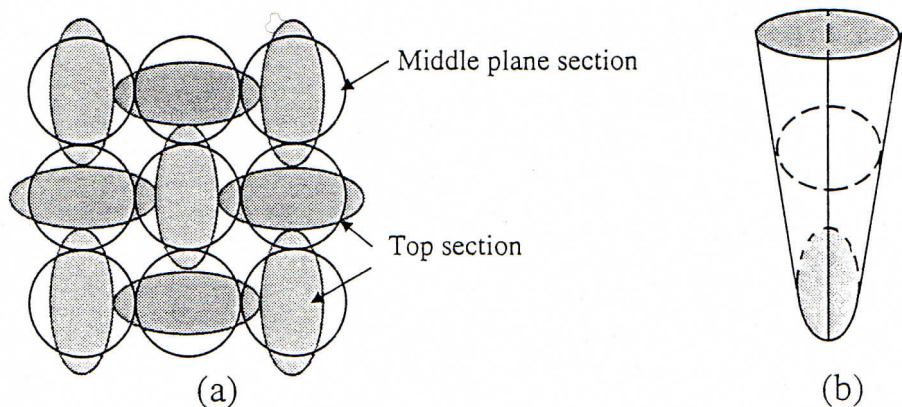


Abb. 7. Anordnung mit einer kreisförmigen Basisfigur.
(a) Schnittebenen und (b) ein Einzelelement.

4. MÖGLICHE ANWENDUNGEN – EIN AUSBLICK

Das oben dargestellte Konzept der topologischen Selbstverzahnung verspricht große Vorteile gegenüber anderen Arten der Selbstverzahnung von „Bausteinen“, die nicht frei von Spannungsspitzen sind. Anwendungen im Leichtbau sind naheliegend. Betrachtet man beispielsweise die Struktur aus Tetraedern, so stellt man fest, dass damit eine Gewichtsersparnis von $1/3$ gegenüber einer massiven Platte gleicher Dicke erreicht wird. Bei Wegfall eines Teils der Tetraeder (was bis zur Perkolationsgrenze zulässig ist) wird eine weitere Gewichtsreduktion erreicht. Bei anderen, in Abschnitt 3 diskutierten, Geometrien, die durch eine hohe Porosität gekennzeichnet sind, kann eine noch größere Gewichtsreduktion erzielt werden.

Dank der Unabhängigkeit der topologischen Selbstverzahnung von der Größe der „Bausteine“ kann man sich Anwendungen in einem breiten Skalenbereich vorstellen: von mörtelfreien Konstruktionen im Bauwesen (z. B. in Fundamenten von

Gebäuden in erdbebengefährdeten Regionen, Auskleidungen von Tunneln, Straßenbepflasterung oder Konstruktionen auf dem Mond, die den Meteoriteneinschlägen standhalten) bis hin zu neuartigen Werkstoffen auf der Basis von (noch zu entwickelnden) mikroskaligen Elementen. Eine Kombination aus erhöhter Bruchzähigkeit, guter Umformbarkeit und niedriger Biegesteifigkeit sowie die Toleranz zu lokalen Fehlstellen macht diese Strukturen schon an sich interessant. Sie können aber auch als Basis für Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde dienen, in denen die in sich verzahnten „Bausteine“ ein festes Gerüst bilden, das für die strukturelle Integrität sorgt, während das zweite Material den gewünschten Funktionseigenschaften Rechnung trägt.

Die Toleranz zu Fehlpackungen kann auch dazu verwendet werden, anstelle einiger „Bausteine“ Elemente gleicher Form aus einem anderen Material einzusetzen, welche die gewünschten Funktionseigenschaften (wie etwa Wärme- oder Schalldämpfung) besitzen – und das bis zu einem Flächenanteil von fast 60%! Eine besondere Attraktivität von Anordnungen aus tetraederförmigen „Bausteinen“ sehen wir in ihrer hohen Bruchzähigkeit und dem erhöhten Widerstand gegenüber Impact-Beanspruchungen. Bei anderen Topologien, wie beispielsweise der in Abb. 7 (wo anstelle massiver auch hohle Elemente denkbar wären) bieten sich Anwendungen in chemischen Reaktoren an, wo eine große Oberfläche gefragt ist. Dabei ließen sich die sonst erforderlichen Fügeverfahren (wie etwa Schweißen) vermeiden.

Die Liste von möglichen Anwendungen könnte man beliebig fortsetzen. Die Hauptfrage ist die der Realisierbarkeit solcher Ideen. Es gilt nun, eine gezielte Suche nach neuen Formen von

„Bausteinen“ zu betreiben, welche die topologische Selbstverzahnung ermöglichen und gleichzeitig die bereits gefundenen Erkenntnisse in Produkten zu realisieren. Hier sind Technologen gefragt, die in der Lage sind, Verfahren zur Massenherstellung von Einzelelementen und zu ihrer Assemblierung zu den hier diskutierten Strukturen entwickeln sollen.

ZITIERTER LITERATUR

- /1/ Dyskin, A.V., Estrin, Y., Kanel-Belov, A. J., Pasternak, E. A
New Concept in Design of Materials and Structures:
Assemblies of Interlocked Tetrahedron-Shaped Elements.
Scripta Materialia, 2001; **44**, 2689-2695.
- /2/ Anand, K.B., Ramamurthy, K. Development and
Performance Evaluation of Interlocking-Block Masonry. *J.*
Architectural Eng., 2000; **6**, 45-51.
- /3/ Parton, V.Z. Fracture Mechanics. From Theory to Practice.
Gordon and Breach Science Publishers, Philadelphia, 1992.
- /4/ Shklovskii, B. I. and Efros, A L., Electronic Properties of
Doped Semiconductors. Springer Series in Solid-State
Sciences, No. 45, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- /5/ Dyskin, A.V., Estrin, Y., Kanel-Belov, A. J., Pasternak, E. A
New Principle in Design of Composite Materials, Proc. of the
Intl. Conf. on Materials for Advanced Technology (ICMAT
2001), Singapore, July 1-6, 2001 (to be published in
Composites Science & Technology)