

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОСТРОЕНИЯ

На правах рукописи

АЛЬ-САХВАНИ ЭЙД ИБРАГИМ ЭЙД

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ КВАЗИХРУПКИХ  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЖАТОГО  
КОМПОЗИТНОГО СТЕРЖНЯ

05.02.07 - Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Харьков - 1997



Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Харьковской государственной академии городского хозяйства.

Научный руководитель кандидат технических наук  
Владимир Николаевич Рудаков

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Олег Константинович Морачковский,  
кандидат технических наук, доцент  
Николай Андреевич Шеломов

Ведущая организация: Харьковский государственный  
технический университет строительства и  
архитектуры (Харьков)

Защита состоится " 9 " июня 1997 года в 14<sup>00</sup> часов на  
заседании специализированного ученого совета Д.02.18.01 в  
Институте проблем машиностроения НАН Украины по адресу:  
310046, Харьков - 46, ул.Пожарского, 2/10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
проблем машиностроения НАН Украины по адресу:  
310046, Харьков - 46, ул.Пожарского, 2/10.

Автореферат разослан " 8 " мая 1997 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета

Б.Ф.Зайцев

**Актуальность исследований:** Все детали машин и механизмов, а также элементы несущих и ограждающих конструкций, независимо от их назначения, обладают собственной массой. Поэтому перед конструкторами ставится повседневная задача без снижения эксплуатационных качеств добиваться уменьшения затрат материалов, особенно для стран Ближнего Востока, в частности, сталь и чугун.

Разработка композитных конструкций, в которых наиболее эффективно использовались бы механические свойства стали и горных пород, является актуальной задачей всех стран мирового сообщества. К наиболее распространенным композитным конструкциям можно отнести трубобетонный стержень (ТБС), преимущественно работающий на сжатие. Целесообразна была бы замена напрягающих и ненапрягающих массивных конструкций (литых чугунных): мощных рам гидравлических прессов, растяжных машин, станин ряда крупногабаритных металлообрабатывающих станков, поперечин карусельных станков, рабочих клетей прокатных станов и т.п. системами таких композитных стержней.

Как показывает практика, можно добиться значительного экономического эффекта. К настоящему времени не в полной мере раскрыт механизм упрочнения квазихрупкого поликристаллического материала (КПМ), твердеющего в замкнутой стальной оболочке. Не разработан математический аппарат, аналитически описывающий упрочнение КПМ, на основе учета взаимодействия физических и механических процессов. Все вышесказанное и определяет актуальность темы диссертации.

Работа выполнена на кафедре строительных конструкций Харьковской государственной академии городского хозяйства (ХГАГХ).

**Цель работы:** Изучить и оценить процесс упрочнения бетонного ядра короткого трубобетонного стержня при сжатии на основе

АН Украины

физических представлений о кинетике деформирования и разрушения КПМ в объемном напряженном состоянии.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи исследований:

– изучить механизм деформирования КПМ с зеренной структурой в условиях трехосного напряженного состояния;

– выявить функциональную связь между основным механическим параметром сплошной среды - коэффициентом Пуассона  $\nu$  и параметром физической модели КПМ с зеренной структурой;

– экспериментально исследовать вариации механических параметров КПМ в зависимости от вида напряженного состояния, масштабного фактора и параметра физической модели КПМ;

– разработать алгоритм определения несущей способности сжатого короткого ТБС на основе учета спонтанной зависимости прочностных характеристик бетонного ядра.;

**Научная новизна работы:**

– установлен механизм деформирования КПМ на основе замены классической модели сплошной среды физической моделью, представляющей квазиизотропное тело в виде множества микротел - жестких зерен. Он выражается в повороте бесконечно большого числа структурных элементов вокруг центральных осей, ортогональных направлениям каждой пары главных нормальных напряжений;

– на основе замены системы главных нормальных напряжений, действующих на элементарный кубик, адекватной системой псевдокасательных напряжений, действующих на плоскостях скольжения и с учетом полных "относительных поворотов" структурных элементов КПМ подтверждена функциональная связь вида:

$$\nu = (1 - \operatorname{tg} \Phi/2) / (2 + \operatorname{tg} \Phi/2),$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\Phi$  – угол скольжения, величина которого определяется из равенства  $\operatorname{tg} \Phi = c/a$ , где  $c/a$  - метрика структурного элемента;

– разработан алгоритм определения несущей способности сжатого короткого ТБС на основе учета спонтанной зависимости прочностных характеристик бетонного ядра, который реализуется с помощью ЭВМ;

– теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что углы скольжения  $\Phi$  реальных КПМ с зеренной структурой существенно отличаются от угла, равного  $45^\circ$  к плоскости действия осевого напряжения при растяжении (сжатии). Для стали Ст30  $\Phi=38^\circ \dots 40^\circ$ , для алюминиевого сплава  $\Phi=29,5^\circ$ , для серого чугуна СЧ-25  $\Phi=48^\circ \dots 50^\circ$ .

**Практическая значимость работы:** Предлагаемая методика определения несущей способности короткого ТБС при осевом сжатии может быть широко использована в прикладных задачах: расчетах стоек транспортных эстакад, опор мостов, столбчатых фундаментов высотных зданий и др. При действии нагрузок большой мощности, которая требует знания всего двух параметров КПМ: призматическая прочность ( $\sigma_c$ ) бетонного ядра и предел текучести ( $\sigma_T$ ) стальной оболочки.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и все полученные результаты опубликованы в 9 научных статьях в соавторстве. В работах [1,2] автором проведены лабораторные испытания, в [3] – анализ теоретических и экспериментальных исследований, в [4,7] для принятой физической модели КПМ выполнено теоретическое исследование, в [5,6] – сбор и систематизация материала по литературным источникам, перевод и обработка зарубежных литературных источников, в [8] – аналитическое решение задачи, в [9] автором разработана программа расчета прочности композитного сжатого стержня.

**Апробация работы:** Основные результаты работы докладывались на международной научно-практической конференции “Проблемы и перспективы ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве”, г. Харьков, 1996 г. и двух научно-практических конференциях Харьковской государственной академии городского хозяйства. В полном объеме диссертация докладывалась и одобрена на заседаниях кафедр

теоретической и прикладной механики, строительной механики и кафедры строительных конструкций ХГАГХ в 1996 г.

**Структура и объем диссертации:** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, имеет приложения и список литературы. Диссертация содержит 124 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 12 таблиц и список литературы в количестве 147 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена состоянию проблемы моделирования прочности КПМ. Упоминается, что наиболее распространенной моделью является однородная среда. Поведение модели в напряженном пространстве описывается с помощью уравнений, которые называются определяющими уравнениями. Механические теории, основанные на фактах макроэксперимента, не учитывают внутренние процессы, происходящие в структурных элементах тела, которые в ряде случаев определяют выбор наиболее адекватной механической модели.

*В первом параграфе* рассмотрены существующие физические модели прочности зернистой среды (ЗС), пластичных, хрупких и квазихрупких тел. Показывается, что в каждой точке ЗС, находящейся в предельном напряженном состоянии, имеются две площадки, называемые площадками скольжения. Эти площадки составляют с направлением большего главного напряжения углы  $(45^\circ - \varphi/2)$  и углы  $(45^\circ + \varphi/2)$ , где  $\varphi$  – угол внутреннего трения. Далее рассматриваются современные представления (Г.В.Самсонова, Я.И.Френкеля и М.Поляни) о механике деформируемого твердого тела, связанные с вопросами прочности на основе теории дислокации, считая, что дислокации играют главную роль в процессах пластической деформации.

Исследование связи деформации на площадке текучести со структурной индивидуальностью материала было проведено Н.Н.Давиденковым. Он особо отмечает роль грани зерен в образовании и протекании пластической деформации. Современные представления о

строении большинства границ основаны на том, что любую границу можно представить как смесь структурных элементов. Наиболее удобной и весьма перспективной для описания структуры границы является модель полиэдров. Одним из основных свойств границ является зернограницное проскальзывание (ЗГП). Опытные данные подтверждают, что при деформации зерна перемещаются и вращаются. Несмотря на обширный экспериментальный материал, подтверждающий связь структуры границ с механическими свойствами КПМ, эта связь не раскрыта. Однако изучение внешних характеристик в большинстве случаев оказывается достаточным для того, чтобы верно представить общую схему поведения деформируемого тела под нагрузкой. При этом показателем состояния твердого тела является коэффициент поперечной деформации, в частности коэффициент Пуассона  $\nu$ , функционально связанный периодической функцией с координационным числом, атомным диаметром и квантовыми числами.

Во втором параграфе рассмотрены некоторые механические теории прочности, которые в той или иной степени могут быть рекомендованы для оценки несущей способности сжатого композитного стержня. Приводятся теории прочности Бельтрами, Мизеса, А.Надаи, Ф.Шлейхера, П.П.Баладина, Н.И.Боткина, А.Ю.Ишлинского, А.Ф.Липатова, А.А.Лебедева и О.Я.Берга и критерий прочности КПМ, разработанный В.Н.Рудаковым в условиях сложного нагружения, который является обобщенным критерием прочности Ишлинского. Этот критерий прочности имеет вид:

$$\sigma_1 = \sigma_c (q / \sigma_p)^{0.5} - \sigma_0^* \quad (1.1)$$

где  $q$  - "эквивалентное сопротивление отрыву", которое определяется в зависимости от схемы раздавливания образца и уровня бокового обжатия  $n_3$ , где  $n_3 = \sigma_3 / \sigma_p$ ;  $\sigma_p$  - сопротивление отрыва;  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . При осевом раздавливании образца: а) в условиях  $0,5 < n_3 \leq 1$

$$q = (\sigma_1^* \cdot \sigma_3^*)^{0.5} + \sigma_p; \quad (1.2)$$

б) в условиях  $n_3 > 1$

$$q = 2(\sigma_1^* \cdot \sigma_3^*)^{0.5}; \quad (1.3)$$

$\sigma_0^*$  - среднее давление начального обжатия, зависящее от схемы нагружения и уровня бокового обжатия  $n_3$ . В условиях  $\sigma_1^* \geq \sigma_2^* \geq \sigma_3^*$  и  $0,5 < n_3 \leq 2$  среднее давление начального обжатия приравняется к начальному шаровому тензору; при  $\sigma_1^* = \sigma_2^* \geq \sigma_3^*$  и  $n_3 > 2$

$$\sigma_0^* = (\sigma_1^* + \sigma_c) / 3, \quad (1.4)$$

где  $\sigma_1^*$ ,  $\sigma_2^*$ ,  $\sigma_3^*$  - главные нормальные напряжения при начальном обжатии образца.

Кроме того, рассматриваются методы расчета прочности композитного стержня, предложенные А.А.Гвоздевым, А.Ф.Липатовым, А.А.Долженко, Я.П.Семененко, Л.И.Стороженко, Р.С.Санжаровским и др.

*В третьем параграфе* главы рассмотрены некоторые эксперименты, проводившиеся исследователями для изучения физической природы прочности твердых тел. Известно, что практика подтверждает существование линий Чернова-людерса на поверхностях пластичных поликристаллических тел при сжатии и растяжении, но она умалчивает об истинных углах направления этих линий для различных материалов. Исторически эта проблема может, по-видимому, сравняться с проблемой определения истинных значений коэффициентов Пуассона для различных материалов. Весьма обстоятельные, ставшие классическими, исследования прочности каменных материалов в условиях сложного напряженного состояния провели Т.Карман, Р.Беккер, М.Рош, А.Эйхингер и другие. В результате обобщения своих опытов Т.Карман сделал следующие выводы: 1) с увеличением гидростатического давления прочность материала повышается и переходит в пластическое состояние; 2) углы, образуемые плоскостями скольжения с плоскостью действия главного сжимающего напряжения, существенно отличаются от  $45^\circ$ .

Результаты опытных исследований позволили В.А.Росновскому, А.А.Долженко, Я.Т.Семененко и др. установить, что бетон в оболочке разрушается от совместного действия скалывающих и растягивающих напряжений на косых площадках. А.А.Долженко, А.Э.А.Э.Лопатто и С.Б.Захаревский показали, что бетон, твердеющий в замкнутой жесткой оболочке, испытывает предварительное напряжение. В момент достижения ТБС предельного состояния по прочности максимум продольного напряжения ( $\sigma_z$ ) в оболочке близок к  $\sigma_T$  и не доходит до уровня последнего лишь на 1,5-3%. При  $\sigma_z = \sigma_T$  деформативность испытываемых ТБС резко возрастает, поэтому В.А.Росновский рекомендует принимать  $\varepsilon_z = 200 \cdot 10^{-5}$ , а Л.И.Стороженко и В.М.Сурдин -  $\varepsilon_z = 220 \cdot 10^{-5}$ .

*В четвертом параграфе* отмечается, что применение ТБС сдерживается из-за недостаточной разработки теории расчета прочности композитных стержней. Почти полное отсутствие физической теории прочности объясняется, на наш взгляд, двумя основными проблемами:

- недостаточным уровнем изученности природы прочности поликристаллических материалов;
- отсутствием хорошо разработанного физического механизма деформирования поликристаллических тел.

*Вторая глава* посвящена разработке модели прочности и деформирования КПМ, учитывающей структурные факторы.

*В первом параграфе* рассматриваются физические теории прочности, основанные на концепции скольжения (Батдорфа-Будянского, М.Я.Леонова). Показано, что одним из предметов критики теории Батдорфа-Будянского стал вопрос о существовании универсальной для любого вида напряженного состояния функции (характеристическая функция сдвига). Принятая ими сферическая форма кристаллов является грубой. Далее рассматривается теория локальных деформаций А.К.Малмейстера. На основе рассмотренных теорий нельзя объяснить направление линий скольжения, кроме того

предельная величина касательных напряжений для разносопротивляющихся одноосному растяжению и сжатию материалов не может быть принята равной  $\sigma_p/2$  и  $\sigma_c/2$ .

Во втором параграфе главы приводится описание ротации структурного элемента КПМ, показывается замена классической модели сплошной среды физической моделью, представляющей изотропное тело в виде множества микротел - жестких зерен. Принимается, что зерна взаимодействуют между собой определенным образом. Особую роль в макроскопическом поведении рассматриваемого материала играют структурные элементы границ жестких зерен в облике бесконечно малой тетрагональной бимирамиды.

По симметрии и числу единичных направлений структурные элементы межзеренных границ отнесены к средней категории, а по сингонии - к тетрагональной. Главная ось симметрии  $\bar{4}$  принимается за ось  $z$ , а оси  $x, y$  расположены в плоскости, ортогональной главной оси. Отрезки по осям  $x, y, a=b$ , поэтому метрика структурных элементов  $c/a = \operatorname{tg} \Phi$ , где  $\Phi$  - угол наклона граней пирамиды к основанию, является материальной константой КПМ (рис.1).

Рассмотрим поведение КПМ в форме элементарного кубика в условиях напряженного состояния

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (2.1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - главные нормальные напряжения на гранях кубика.

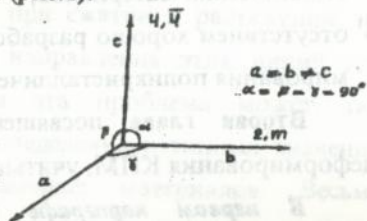


Рис.1

Система напряжений (2.1) вызывает перемещения кристаллитов твердого тела вдоль плоскостей скольжения, направление которых определено нормальными  $x_i$ , где  $i=1,2,3$  (рис.2). Углы отклонения нормалей  $x_i$  от соответствующих осей  $i$  равны  $\Phi$ , где  $\Phi$  по величине совпадает с метрикой структурных элементов межзеренных границ, имеющих самый низкий энергетический уровень.

Под перемещением системы кристаллитов понимается сложное движение, которое согласно теоремам Эйлера, Шаля и Пуансо раскладывается на простейшие: вращательное вокруг центральной оси (оси винта) и поступательное, совпадающее с направлением

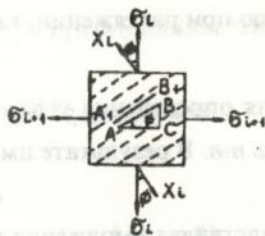


Рис. 2

центральной оси. Направление центральной оси (оси минимальных моментов) ортогонально направлению действия осевого усилия.

Таким образом, деформация элементарного кубика по направлению каждой пары главных нормальных напряжений  $\sigma_i$  и  $\sigma_{i+1}$  обусловлена только поворотом кристаллитов.

Поставим задачу отыскания "относительного поворота"  $\epsilon'_i$ , где  $i=1,2,3$ , единичного линейного (структурного) элемента  $dS$  в точке  $A$  вдоль направления плоскости скольжения. Определим величину относительного поворота  $\Theta'_{\phi_i}$  элемента  $dS$  под действием  $\sigma_i$  (рис.2). При растяжении кубика точки  $A$  и  $B$  переместятся и займут положение  $A_1$  и  $B_1$ . Определим угол поворота  $\omega_i$ , на который поворачивается элемент  $AB=dS=1$  вокруг оси, перпендикулярной к плоскости рисунка. Для этого совместим точки  $A$  и  $A_1$ , рассмотрим взаимное расположение отрезков  $AB$  и  $A_1B_1$ , предварительно отметив на рисунке вспомогательные точки  $C$  и  $D$  и прямую  $mm \perp A_1B_1$  (рис.3).

Относительное продольное удлинение и поперечное сужение равно  $\epsilon_i = BD / AB$ , отсюда  $BD = \epsilon_i \sin \Phi$ ;  $\nu \epsilon_i = B_1D / AC$ , отсюда  $B_1D = \nu \epsilon_i \cos \Phi$ , угол поворота  $\omega_i = \Theta_i AB$ , где  $\Theta_i$  - относительный поворот (относительный угол закручивания). Величина  $\Theta_i$  аналогична относительному удлинению

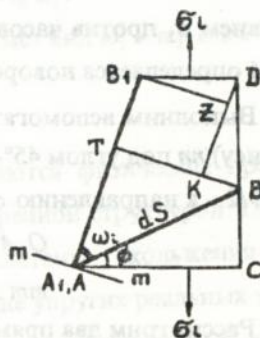


Рис.3

нию при растяжении, т.е.  $\Theta_1 = k(\Delta l / l)$ ; тогда  $\Theta_1 = \omega_1 / AB$  или:

$$\Theta_1 = \omega_1 / \sin\Phi.$$

Для определения угла поворота  $\omega_1$  спроектируем ломаную  $AA_2A_1O_1$  на ось  $n$ - $n$ . В результате имеем (при условии  $\omega_1 \ll \Phi$ ):

$$\omega_1 = AA_2 \cos\Phi + A_1A_2 \sin\Phi;$$

подставляя выражения для отрезков  $AA_2$  и  $A_1A_2$ , получим:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \varepsilon_1 \sin\Phi \cos\Phi + \nu \varepsilon_1 \sin\Phi \cos\Phi = \varepsilon_1(1 + \nu) \sin\Phi \cos\Phi = \\ &= \sigma_1 (\sin\Phi \cos\Phi)(1 + \nu) / E = \tau_{\Phi 1} (1 + \nu) / E. \end{aligned}$$

С учетом этой формулы найдем относительный поворот:

$$\Theta_1 = \tau_{\Phi 1} (1 + \nu) / (E \sin\Phi). \quad (2.2)$$

На величину полного поворота элемента  $dS$  оказывают влияние две пары главных напряжений, действующих в системе двух ортогональных плоскостей, которые независимо от угла (скольжения)  $\Phi$  остаются параллельными одной из главных осей, совпадающей по направлению с центральной осью. Используя принцип суперпозиции, усугубляем влияние на величину угла поворота единичного структурного элемента (ЕСЭ)  $\omega_1$  главного нормального напряжения  $\sigma_2$ , направление которого ортогонально оси вращения ЕСЭ. На рис. (4) плоскости действия  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  совмещены с плоскостью листа, для чего плоскость действия  $\sigma_1$  повернута вокруг ребра (линия  $LL$ ) на  $\angle 90^\circ$  против часовой стрелки. Единичный структурный элемент  $Q_1A$  поворачивается вокруг оси  $Q_1$ , которая ортогональна плоскости рисунка, под действием  $\sigma_2$  против часовой стрелки, т.е. на угол  $\omega_2^*$ . Ротация элемента  $Q_1A$  определяется поворотом элемента  $O_2A$  вокруг оси  $O_2 \parallel Q_1$ .

Выполним вспомогательные построения, т.е. проведем ось (биссектрису)  $mn$  под углом  $45^\circ - \Phi/2$  к направлению  $\sigma_2$  и под углом  $45^\circ + \Phi/2$  – к направлению  $\sigma_1$ . Так как единичные элементы

$$O_2A \perp Q_1A, \quad (2.3)$$

$$mn \perp nn. \quad (2.4)$$

Рассмотрим два прямоугольных треугольника  $Q_1C_1^*B_1^*$  и  $O_2C_2^*A$ , в

которых катеты  $O_1C_2^*$  и  $C_2^*B_1^*$ ,  $O_2C_2$  и  $AC_2$  - ортогональны. Поскольку углы  $\omega_2$  и  $\omega_2^*$  малы, имеем

$$\angle CC_2^*A = 90^\circ - \Phi; \quad \angle CC_2^*B_1^* = 90^\circ; \quad \angle AC_2^*B_1^* = \Phi$$

и, следовательно,

$$C_2^*B_1^* = C_2^*A \cos \Phi. \quad (2.5)$$

Кроме того, из  $\Delta O_1C_2^*B_1^*$  находим (при условии  $O_1A=1$ )

$$O_1B_1^* = 1 - C_2^*A \sin \Phi; \quad (2.6)$$

$$C_2^*B_1^*/O_1C_2^* = \operatorname{tg} \omega_2^*,$$

а из  $\Delta O_2C_2A$ :

$$AC_2 = \operatorname{tg} \omega_2. \quad (2.7)$$

Подставляя (2.5) в (2.6), получим

$$C_2^*A \cos \Phi / (1 - C_2^*A \sin \Phi) = \operatorname{tg} \omega_2^*. \quad (2.8)$$

Далее рассмотрим два других прямо-

угольных треугольника  $AMC_2^*$  и  $AMC_2$ . В соответствии с (2.3) и (2.4)

$$\angle AMC_2^* = \angle AMC_2 = 90^\circ;$$

$$\angle AC_2^*M = \angle AC_2M = 45^\circ - \Phi / 2.$$

Следовательно,  $\Delta AMC_2^*$  является отображением  $\Delta AMC_2$  относи-

тельно  $mn$  и тогда, очевидно,

$$AC_2^* = AC_2. \quad (2.9)$$

С учетом (2.7) и (2.9) выражение (2.8) можно представить в виде

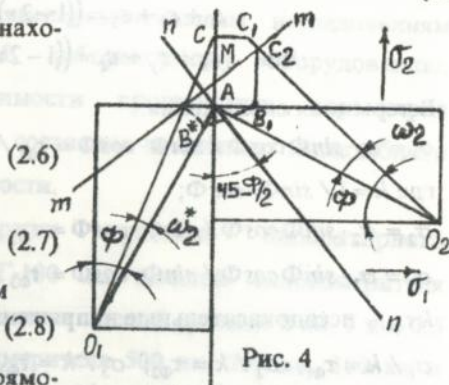
$$\operatorname{tg} \omega_2 \cos \Phi / (1 - \operatorname{tg} \omega_2 \sin \Phi) = \operatorname{tg} \omega_2^*. \quad (2.10)$$

Так как  $\operatorname{tg} \omega_2 \cdot \sin \Phi \ll 1$ , то (2.10) примет вид  $\omega_2^* = \omega_2 \cdot \cos \Phi$ . Значит,

$$\varepsilon_i^* = \Theta_i - \Theta_{i1} \cdot \cos \Phi, \quad (2.11)$$

где  $i=1,2,3$ .

В третьем параграфе излагаются физические представления о протекании деформации КПМ с зеренной структурой. Предполагается существование только одной системы скольжения (Батдорф - Будянский). Показано, что поведение упругих реальных тел " $0 < \nu < 0,5$ ;  $0 < \Phi < 90^\circ$ " описывается с помощью модуля упругости  $E$ , коэффициента



Пуассона  $\nu$ . Преобразуем обобщенный закон Гука в терминах скольжения

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) / E, \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_2 = \sigma_2 / E - \nu(\sigma_1 + \sigma_3) / E,$$

$$\varepsilon_3 = \sigma_3 / E - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) / E,$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = ((1 - 2\nu) / E)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = const$$

$$\text{или } \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = ((1 - 2\nu) / E)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = const.$$

В терминах скольжения:

$$\sigma_1 = \sigma_1 \cdot \sin\Phi \cos\Phi / \sin\Phi \cdot \cos\Phi = \tau_{\Phi 1} / \sin\Phi \cdot \cos\Phi = k\tau_{\Phi 1},$$

где  $k = 1 / \sin\Phi \cdot \cos\Phi$ ;

$$\sigma_2 = \sigma_2 \cdot \sin\Phi \cos\Phi / \sin\Phi \cdot \cos\Phi = \tau_{\Phi 2} / \sin\Phi \cdot \cos\Phi = k\tau_{\Phi 2},$$

$$\sigma_3 = \sigma_3 \cdot \sin\Phi \cos\Phi / \sin\Phi \cdot \cos\Phi = \tau_{\Phi 3} / \sin\Phi \cdot \cos\Phi = k\tau_{\Phi 3},$$

$k\tau_{\Phi i}$  – псевдокасательные напряжений;  $i=1,2,3$ .

$$\sigma_1 / k = \tau_{\Phi 1}; \quad \sigma_2 / k = \tau_{\Phi 2}; \quad \sigma_3 / k = \tau_{\Phi 3};$$

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) / k = ((1 - 2\nu) / E)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / k =$$

$$= (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) / k = ((1 - 2\nu) / E)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / k =$$

$$= \varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* + \varepsilon_3^* = ((1 - 2\nu) / E)(\tau_{\Phi 1} + \tau_{\Phi 2} + \tau_{\Phi 3}) = \quad (2.13)$$

$$= \varepsilon_x^* + \varepsilon_y^* + \varepsilon_z^* = ((1 - 2\nu) / E)(\tau_{\Phi x} + \tau_{\Phi y} + \tau_{\Phi z}) = const.$$

Введя (2.11) и (2.2) в левую часть (2.13) и сделав соответствующие преобразования, находим

$$\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* + \varepsilon_3^* = (1 + \nu)(1 - \cos\Phi)(\tau_{\Phi 1} + \tau_{\Phi 2} + \tau_{\Phi 3}) / E \sin\Phi. \quad (2.14)$$

Приравняв правые части (2.2) и (2.14), получим функционально связывающий параметр микроструктуры межзеренной границы с материальной константой  $\nu$  в форме

$$tg\Phi / 2 = (1 - 2\nu) / (1 + \nu) \text{ или}$$

$$\nu = (1 - tg\Phi / 2) / (2 + tg\Phi / 2). \quad (2.15)$$

Для хрупких материалов типа тяжелых бетонов при  $\Phi = 58,34 \dots 64,4^\circ$  коэффициент Пуассона изменяется в пределах  $\nu = 0,173 \dots 0,13$ . Для мягкой конструкционной стали при  $\nu = 0,28$  угол наклона линии скольжения составляет  $\Phi = 38,0^\circ$ . Соотношение

прочностных характеристик рассматриваемого КПМ представляется в виде  $\tau_k = \sigma_p \cdot \operatorname{tg} \Phi$  и  $\sigma_p = 0,5 \cdot \sigma_c \cdot \cos^2 \Phi$ , где  $\tau_k$  – сопротивление срезу.

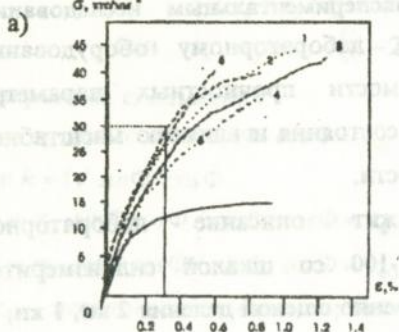
Теоретический анализ этих зависимостей показывает хорошую сходимость с данными известных немецких ученых (Фере, Мерша, Ото Мора).

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям прочности образцов из КПМ, лабораторному оборудованию, методике исследования, зависимости прочностных параметров материала от вида напряженного состояния и влиянию масштабного фактора на характеристики прочности.

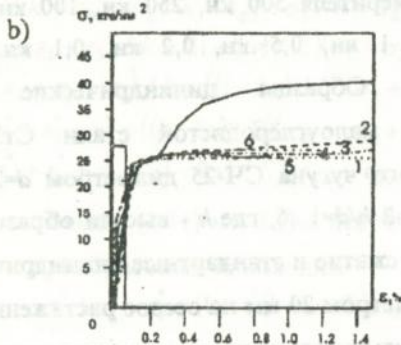
*Первый параграф* содержит описание лабораторного лабораторного оборудования ПГ-100 со шкалой силоизмерителя 1000 кн, 500 кн, 250 кн и соответственно с ценой деления 2 кн, 1 кн, 0,5 кн, УИМ-50 со шкалой силоизмерителя 500 кн, 250 кн, 100 кн и соответственно с ценой деления 1 кн, 0,5 кн, 0,2 кн, 0,1 кн и направляющие приспособления. Образцы цилиндрические с полированной поверхностью из малоуглеродистой стали Ст30, алюминиевого сплава Д-16 и серого чугуна СЧ-25 диаметром  $d=20$ ,  $d=30$ ,  $d=40$ ,  $d=50$ ,  $d=60$  мм и высотой  $h/d=1...6$ , где  $h$  – высота образца, принятых для испытания на осевое сжатие и стандартные цилиндрические образцы (ГОСТ 1497-841) диаметром 20 мм на осевое растяжение. Продольные и поперечные деформации замеряли с помощью тензостанции SA-2. Методика проведения испытаний соответствовала ГОСТам 1497-84 и 25.503-80. Направление линий скольжения Чернова-Людерса на гладких полированных поверхностях образцов определялось путем замера соответствующих углов на фотоснимках с фиксированной ортогональной сеткой.

*Во втором параграфе* рассматриваются зависимости прочностных характеристик материалов от вида напряженно-деформированного состояния и параметра хрупкости. Некоторые результаты экспериментальных исследований на сжатие и растяжение представлены в виде

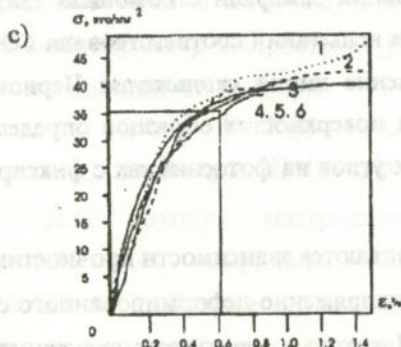
графиков зависимости  $\sigma - \epsilon$  (рис. 4 а,б,с) без учета изменения площади поперечного сечения в процессе их деформирования. Анализ экспериментальных данных стальных образцов на сжатие при  $h/d > 2$ , имеющих явную площадку текучести при растяжении, показывает, что примерно при одинаковой относительной продольной деформации, равной



Серый чугун СЧ-25  
диаметр 35 мм



Сталь малоуглеродистая,  
марки Ст30  
диаметр 60 мм



Алюминиевый сплав марки Д-16  
диаметр 20 мм

— осевое растяжение;  
осевое сжатие:

..... 1  $l/d=1$ ;     --- 4  $l/d=4$   
..... 2  $l/d=2$ ;     --- 5  $l/d=5$   
..... 3  $l/d=3$ ;     --- 6  $l/d=6$

Рис. 4. Исследование изменения  $\epsilon = f(\sigma)$  от вида напряженного состояния и масштабного фактора.

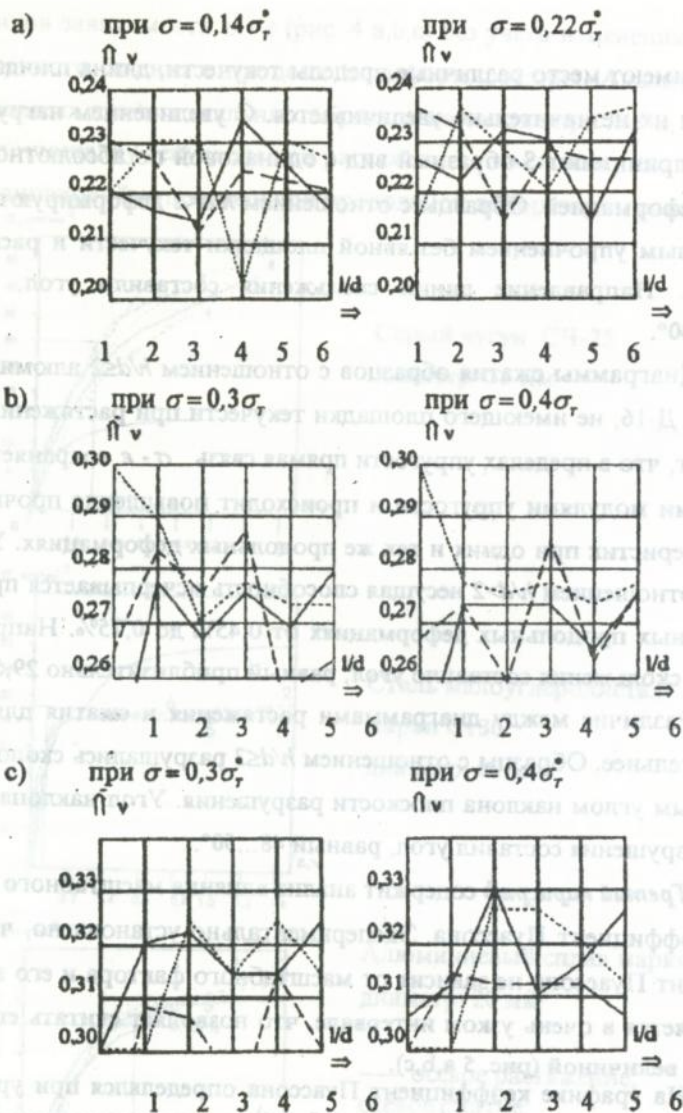
0,14%, имеют место различные пределы текучести, длина площадки текучести их незначительно увеличивается. С увеличением нагрузки образцы принимают S-образный вид с одинаковой по абсолютной величине деформацией. Образцы с отношением  $h/d < 2$  деформируются с постепенным упрочнением без явной площадки текучести и расплющиваются. Направление линий скольжения составило угол, равный  $\approx 38^\circ \dots 40^\circ$ .

Диаграммы сжатия образцов с отношением  $h/d \leq 2$  алюминиевого сплава Д-16, не имеющего площадки текучести при растяжении, показывают, что в пределах упругости прямая связь  $\sigma - \varepsilon$  сохраняется, но с разными модулями упругости и происходит повышение прочностных характеристик при одних и тех же продольных деформациях. У образцов с отношением  $h/d > 2$  несущая способность исчерпывается при относительных продольных деформациях от 0,45% до 0,75%. Направление линий скольжения составило угол, равный приблизительно  $29,5^\circ$ .

Различие между диаграммами растяжения и сжатия для чугуна значительнее. Образцы с отношением  $h/d \leq 3$  разрушались сколом с одинаковым углом наклона плоскости разрушения. Угол наклона плоскости разрушения составил угол, равный  $48 \dots 50^\circ$ .

*Третий параграф* содержит анализ влияния масштабного фактора на коэффициент Пуассона. Экспериментально установлено, что коэффициент Пуассона не зависит от масштабного фактора и его величина изменяется в очень узком интервале, что позволяет считать его постоянной величиной (рис. 5 а, б, в).

На графике коэффициент Пуассона определялся при уровне напряжений: для стали  $\sigma = (0,3; 0,4; 0,5; 0,6)\sigma_T$ ; для алюминиевого сплава  $\sigma = (0,3; 0,4; 0,5; 0,6)\sigma_T^*$ ; для серого чугуна  $\sigma = (0,14; 0,22; 0,3; 0,36)\sigma_T^*$ , где  $\sigma_T$  - предел текучести при растяжении;  $\sigma_T^*$  - условный предел текучести при растяжении.



Условные обозначения: --- d=20 мм; -.- d=40 мм; — d=60 мм.

Рис. 5. Вариации коэффициента Пуассона  $\nu$  по данным испытаний цилиндрических образцов на осевое сжатие в зависимости от масштабного фактора: а) серый чугун СЧ-25; б) сталь марки Ст30; в) алюминиевый сплав марки Д-16.

Четвертая глава посвящена прикладным задачам прочности композитных стержней с ядром из КПМ.

В первом параграфе рассмотрены три типа существующих расчетных схем композитных стержней при их работе на сжатие и изгиб (металлические оболочки различного поперечного сечения, заполненные КПМ). Проанализированы существующие подходы к построению схем каркасов несущих конструкций с применением ТБС. Приводятся данные, свидетельствующие об эффективности применения ТБС в промышленном строительстве, мосто- и машиностроении.

Во втором параграфе автором диссертации разработан алгоритм определения прочности ( $F$ ) композитного стержня с ядром из КПМ при осевом сжатии вида

$$F = A_c \sigma_r + A_g \sigma_1, \quad (4.1)$$

где  $A_c$  - площадь поперечного сечения стальной трубы;  $A_g$  - площадь поперечного сечения полости трубы;

$\sigma_1$  - прочность КПМ ядра, зависящая от величины продольной деформации стержня. При  $\varepsilon = 220 \cdot 10^{-5}$

$$\sigma_1 = \sigma_c \sqrt{q / \sigma_p - \sigma_0^*}, \quad (4.2)$$

$$q = \sigma_0^* + \sigma_p; \quad (4.3)$$

$$\sigma_p = 0,5 \sigma_c \cdot \cos^2 \Phi; \quad (4.4)$$

$q$  - "эквивалентное сопротивление отрыву";

$$\sigma_0^* = K_0 \sigma_1 = [(1 - \lg \Phi / 2) / (1 + 2 \lg \Phi / 2)] \cdot \sigma_1; \quad (4.5)$$

$K_0$  - коэффициент бокового давления.

При  $\varepsilon = \varepsilon_r$  в формуле (4.2) "эквивалентное сопротивление отрыву" принимается равным  $q = 3\sigma_0^* + \sigma_c$ . Для определения разрушающей нагрузки в формуле (4.1) необходимо предел текучести  $\sigma_r$  заменить пределом прочности  $\sigma_{sp}$ , а в (4.3) "эквивалентное сопротивление отрыву" принять равным  $q = 2\sigma_0^*$ .

Третий параграф содержит сравнения прочности расчетных данных ТБС при осевом сжатии. На основе алгоритма была составлена программа на алгоритмическом языке Турбо Паскаль 7. В качестве

исходных параметров вводились наружный и внутренний диаметры стержня, предел текучести и призмная прочность.

В таблице приведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментами (Росновского В.А., Липатова А.Ф.) при  $\varepsilon = 220 \cdot 10^{-5}$ ,  $\sigma_r = 27,47 \text{ кН/см}^2$ .

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сечение трубы, мм	302x2	254x2	204x2	154x2	104x2	310xх2	308x4	306x3	306xх3	304x2
$A_s$ , см <sup>2</sup>	706,0	490,0	314,0	176,0	78,0	706,0	706,0	706,0	706,0	706,0
$A_c$ , см <sup>2</sup>	18,8	15,7	12,5	9,4	6,3	47,1	37,7	28,3	28,3	18,8
$\sigma_c$ , кН/см <sup>2</sup>	2,89	2,89	2,89	2,89	2,89	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
$\Phi$ , град.	64,23	64,23	64,23	64,23	64,23	64,18	64,18	64,18	64,18	64,18
$\sigma_r$ , кН/см <sup>2</sup>	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271
$K_0$	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165	0,165
$\sigma_1$ , кН/см <sup>2</sup>	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
$F_s$ , кН	3502,2	2430,7	1557,6	873,0	386,9	3460,4	3460,4	3460,4	3460,4	3460,4
$F_c$ , кН	516,4	431,3	343,4	258,2	173,1	1293,8	1035,6	777,4	777,4	516,4
$F$ , кН	4018,6	2862,0	1901,0	1131,1	559,9	4754,3	4496,1	4237,8	4237,8	3976,9
$F_s$ , кН	4002,5	2540,8	1844,3	1206,6	564,1	4905	4512,6	4326,2	4120,2	4002,5
$\Delta\% = (F - F_s) / F_s \cdot 100\%$	+0,4	+12,64	+3,07	-6,24	-0,72	-3,07	-0,36	-2,04	+2,85	-0,63

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлен механизм упрочнения бетонного ядра в тонкостенной стальной оболочке, который заключается в том, что при твердении бетонного ядра в стальной обиме бетон испытывает начальное объемное обжатие, эквивалентное наложению начального шарового тензора, величина которого определяется структурным фактором бетона.

Используя критерий упрочнения КПМ в условиях начального объемного обжатия, разработанный В.Н.Рудаковым, и учитывая

спонтанную зависимость механических характеристик бетона на основе структурного фактора - угла скольжения  $\Phi$ , разработан алгоритм определения несущей способности ТБС, требующий знания только двух механических параметров ТБС:

- призмной прочности;
- предела текучести стальной оболочки.

Полученные с использованием ПЭВМ результаты хорошо согласуются с опытными практически для всех классов тяжелого бетона.

2. На основе физического представления протекания деформации установлен механизм деформирования КПМ с зернистой структурой в условиях сложного напряженного состояния.

По нашему представлению, деформация есть результат наложения бесконечно большого числа поворотов структурных элементов вокруг трех главных осей, ортогональных каждой паре из трех главных нормальных напряжений. Поворот структурных элементов (СЭ) осуществляется в плоскостях скольжения, направление которых в силовом поле определяется метрикой координационных полиэдров Л.Полинга, образующих плотнейшую упаковку.

3. Путем замены системы главных нормальных напряжений, действующих на гранях элементарного кубика, адекватной системой псевдокасательных напряжений, действующих на плоскостях скольжения кубика, направление которых определяется структурным фактором КПМ с зернистой структурой, подтверждена функциональная связь между основным механическим параметром модели реального тела - сплошной среды - коэффициентом Пуассона  $\nu$  с метрикой структурного полиэдра, представляющего реальное поликристаллическое тело, вида:

$$\nu = (1 - \operatorname{tg} \Phi / 2) / (2 + \operatorname{tg} \Phi / 2).$$

4. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что направление линий скольжения на боковых поверхностях цилиндрических образцов при осевом сжатии существенно отличается от траекто-

рии максимальных касательных напряжений. Так, для алюминиевого сплава марки Д-16 оно составило угол, равный  $\alpha=29,5^\circ$ , для серого чугуна марки СЧ-25 - угол, равный  $\alpha=48-50^\circ$ , для конструкционной стали марки Ст30 - угол, равный  $\alpha=38^\circ$ , т.е. для рассматриваемых материалов зависимость

$$\nu = (1 - \operatorname{tg} \Phi/2)/(2 + \operatorname{tg} \Phi/2)$$

нашла опытное подтверждение.

5. Экспериментально подтверждено, что прочностные характеристики КПМ зависят от вида напряженного состояния и масштабного фактора. В то же время коэффициент Пуассона  $\nu$  рассматриваемых материалов, функционально связанный с углом скольжения  $\Phi$ , является константой, т.е. его значение не меняется со сменой знака осевого напряжения и не зависит от масштабного фактора.

## РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аль-Сахвани Э.И., Рудаков В.Н., Смолянинов Ю.М. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента Пуассона конструкционных материалов от вида напряженного состояния и масштабного фактора // Тез. докл. XXVIII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. - Харьков, 1996. - С.14.
2. Кись Ю.П., Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Экспериментальная проверка условий пластического течения Треска и Сен-Венана-Мизеса при одноосном растяжении конструкционных материалов // Тез. докл. XXVIII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. - Харьков, 1996. - С.12-13.
3. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Некоторые вопросы повышения эффективности использования сталей в несущих стержневых конструкциях // Тез. докл. XXVII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ. - Харьков, 1994. - С.16.

4. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Механизм развития поперечной деформации квазиизотропных поликристаллических материалов с зеренной структурой // Тезисы докладов междунар. конф. "Проблемы и перспективы ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве". - Харьков, 1995. - С.77.
5. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. К расчету несущей способности центрально сжатых стержней. Сб. науч. тр. "Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений городского хозяйства". - К.: 1995. - С.43-50.
6. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Зарубежный опыт проектирования стальных стержней, сжатых осевой силой. Сб. науч. тр. "Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений городского хозяйства". - К.: 1995. - С.50-57.
7. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Влияние структурного фактора на процесс деформирования конструкционных металлов при простом нагружении // Коммунальное хозяйство городов. Республ. межвед. сборник. Вып.6. - К.: Техніка, 1996. - С.4-9.
8. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Об изменении угла поворота единичного структурного элемента поликристаллического квазиизотропного материала в условиях трехосного растяжения (сжатия) // Коммунальное хозяйство городов. Республ. межвед. сборник. Вып.8. - К.: Техніка, 1997. - С.42-45.
9. Рудаков В.Н., Аль-Сахвани Э.И. Алгоритм определения прочности короткого композиционного стержня при осевом сжатии с учетом структурного фактора материала ядра сечения // Коммунальное хозяйство городов. Республ. межвед. сборник. Вып.8. - К.: Техніка, 1997. - С.63-66.

Аль-Сахвані Е.І.Е. Розробка теоретичної та експериментальної обґрунтованої структурної моделі квазікрихких полікристалічних матеріалів для оцінки несучої здатності стиснутого композитного стержня.

Рукопис дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05-02-07 - механіка деформованого твердого тіла. Інститут проблем машинобудування НАН України, Харків, 1997.

Вивчено і аналітично описано механізм деформації КПМ, згідно з яким деформація є результатом накладання нескінченного числа поворотів структурних елементів меж КПМ. Встановлено функціональний зв'язок метрики структурних елементів з коефіцієнтом Пуассона. Розроблено алгоритм міцності композитного стержня.

*Ключові слова:* квазікрихкий, полікристалічний матеріал, зернисте середовище, зернограничне проковзування, початкове об'ємне обтискування, трубобетонний стержень.

#### SUMMARY

Al-Sahwani Eid Ibrahim Eid. Development and experimental basis on model of quasi-brittle and polycrystal materials to estimate the bearing capacity of composite member under uniaxial loading. Dissertation is in the level of candidate in technical and scientific science in the speciality 05-02-07 - mechanics of deformed solids. Institute of machinery problem of Ukrainian National Academy of science, Kharkov, 1997.

The mechanism of deformation of quasi-isotropic and polycrystal materials considering the structural factors is studied and analytically described. Deformation here is considered as a result of infinite rotation quantity of structural members of grains border. Functional relation of structural member metrics with Poisson's coefficient was established. An algorithm to evaluate the strenght of composite member was worked out and compared with experimental data.

*Ответственный за выпуск*

*Молодченко Г.А.*

Подп. к печ. 14.04.97 г. Формат 60x90 1/16. Бумага писч. №1. Усл.печ.л.1,5, уч.-изд.л. 1,08. Тираж 110 экз. Заказ № 285.  
ХГАГХ, 310002, Харьков, ул.Революции, 12. Сектор ОП ИВЦ ХГАГХ.