

ВЛ.И. КОЛЧУНОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

## ФИЗИЧЕСКАЯ СУТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ОТ ДИСЛОКАЦИЙ ДО ТРЕЩИН

**Аннотация.** Исследуется физическая суть сопротивления бетона и железобетона от дислокаций, микротрещин до макротрещин и их приводится экспериментальное обоснование. Для «восьмерки» структуры кристаллов различных материалов (бетона и стали) разработана общая модель в виде шара, для которого записано суммирование объемных секторов, уровней – радиусов из матрицы плоскостей скольжения. При этом используется альтернатива теории пластичности в виде энергетической интерпретации на поверхности сферы и определения интеграла среднего квадратичного значения касательных напряжений. Показана важность получения дислокаций в микротрещине, угловых и линейных деформаций, перемещений в представительном объеме куба бетона. При повышении интенсивности нагружения процесс деформирования переходит уже в магистральные трещины, где используется строительная механика двухконсольных элементов для растяжения, сжатия, поперечного сдвига и кручения. В качестве условия прочности бетона приняты предельная интенсивность деформаций сдвига или чистый сдвиг. Значимыми вопросами является модуль дилатации и коэффициент поперечных деформаций, для которых получены функции на всех стадиях напряженно-деформированного состояния бетона при эволюции перехода от трещинообразования до магистральных трещин.

Диаграммы сжатия и растяжения бетона для интенсивности деформаций или минимального чистого сдвига используют касательные напряжения  $0,6R_{bt}$ . Принципиальное отличие диаграммы на ниспадающем участке заключается в использовании здесь предельного сопротивления бетона. Уменьшение напряжений в материале, разрушение которого носит «отрывной» характер – явление противостественное, а предельное сопротивление бетона при  $\varepsilon_b = \varepsilon_{b,i}$  и снижения призмочной прочности на  $i$ -й ступени равно  $\alpha_i R_b$ . Характер деформирования бетона при образовании более ранних микротрещин, а потом поздних магистральных трещин ориентирован вдоль линии нагружения - при сжатии, либо поперек - для усилия растяжения.

**Ключевые слова:** физическая суть, сопротивление, бетон, железобетон, дислокации, трещины, дилатация.

VL.I. KOLCHUNOV<sup>1</sup><sup>1</sup>Southwestern State University, Kursk, Russia

## THE PHYSICAL ESSENCE OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE RESISTANCE FROM DISLOCATIONS TO CRACKS

**Abstract.** The physical essence of resistance of concrete and reinforced concrete from dislocations, micro-cracks to macro-cracks and its experimental justification is investigated. For the "eight" structure of crystals of different materials (concrete and steel) a general model in the form of a sphere was developed. For it the summation of volume sectors, levels - radii from the matrix of sliding planes (including octahedral and pure shear) is written down. This uses an alternative to the theory of plasticity in the form of energy interpretation on the surface of the sphere and determining the integral of the mean square of the tangential stresses. It is important to obtain dislocations in the microcrack, angular and linear deformations, and displacements in a representative volume of the concrete cube. As the intensity increases, the deformation process proceeds already to the mainline cracks, where the double-concole elements of tension, compression, transverse shear and torsion (its internal parameters)

*are refined. Significant issues are the dilatation modulus and transverse coefficient, for which functions have been developed at the stages of the stress-strain state of concrete during the evolution of the transition from crack formation to main cracks.*

*Concrete compression and tension diagrams for strain intensity or minimum pure shear use shear stresses. The fundamental difference of the stress diagram in the downward section is the use of the ultimate resistance of the concrete. Stress reduction in a material whose failure has a "tear-off" character is an unnatural phenomenon, and the limiting resistance of concrete at  $\varepsilon_b = \varepsilon_{b,u}$  and reduction of prism strength at the  $i$ -th step is  $\alpha_i R_b$ . The deformation pattern of concrete during the formation of earlier microcracks and then later main cracks is oriented along for compression or across the loading line for tensile force.*

**Keywords:** *physical essence, resistance, concrete, reinforced concrete, dislocations, cracks, dilatations.*

### **Введение.**

Совершенствование механики сопротивления бетона и железобетона становится возможным благодаря новым технологиям экспериментальных исследований, и сближению физических явлений и развиваемых расчетных моделей [1-4]. Целесообразно под термином «модель» понимать разные ее функции на различных этапах исследований. Методически правильным будет принять следующую понятийную иерархию: физическая модель, расчетная модель, математическая модель [5-6].

В настоящее время повышение классов бетона и железобетона как основных строительных материалов и их эффективности входит в число важнейших проблем строительства. Расчетные предпосылки, модели сопротивления позволяют более гибко использовать достижения в области смежных дисциплин механики твердого деформированного тела, физики твердого тела и активно развивающейся механики разрушения на основе их синтеза. Структура построения моделей отвечает современному уровню эволюции расчетного аппарата железобетона [6-9].

В связи с этим в рассматриваемой статье в качестве объекта исследования рассматривается процесс силового сопротивления бетона и железобетона для трех стадии напряженно-деформированного состояния от микродислокаций до макротрещин.

Целью исследования явилось установление физической сути эффективного сопротивления кристаллов бетона и железобетона на основе сформулированной общей модели от микродислокаций до макротрещин и их экспериментальное обоснование.

В задачи исследования включались: построение варианта общей модели сопротивления бетона и железобетона для трех стадии напряженно-деформированного состояния от микродислокаций до макротрещин; определение сдвигов, ширины раскрытия трещин; уточнение предложенных форм двухконсольных элементов растяжения, сжатия, поперечного сдвига и кручения; обоснование возможности использования предельного значения интенсивности деформаций сдвига в качестве условия прочности бетона; получение функции модуля дилатации и коэффициента поперечных деформаций на всех стадиях напряженно-деформированного состояния бетона.

### **Материалы и методы.**

На уровне молекулярного строения процессы, происходящие в материале при деформации, объясняются средствами механики сплошной среды на основе упругости и пластичности [10, 11]. При затвердевании металла из расплава возникает очень много центров кристаллизации с кристаллическими зёрнами и происходит образование решетки.

Наиболее распространенными типами кристаллических структур металлов является: *гексагональная плотноупакованная структура*, - первый слой связей атомов показан сплошными линиями на рисунок 1 и 2, б, второй слой - на том же рисунке пунктиром, третий слой окажется над центрами шаров первого слоя; *кубическая гранецентрированная*

структура (рисунки 1 и 2), - то же, чередующиеся ряды треугольников; *кубическая объемноцентрированная структура* (см. рисунок 4 - в кристаллах наблюдается так называемая мозаичная или блочная).

Пластическая деформация в монокристалле имеет механизм, где совершается сдвиг и скольжение слоев атомов в кубической решетке по определенным направлениям. Октаэдрические плоскости структуры куба (двадцать четыре внутренние рисунок 1, h или восемь внешних (см. рисунок 2, a), где возможные системы скольжения заданы направляющими косинусами  $l, m, n$  для главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  осей 1, 2, 3. Угловые деформации направлены по диагонали, где они достигают критического значения между плоскостями скольжения.

Теоретическая прочность кристалла превышает фактически наблюдаемую низкую прочность, а дефекты строения начинаются со слабого места, что является *источником концентрации* деформации (напряжения) при движении на одно межуатомное расстояние  $b$ . При малых смещениях  $F = F_0(2\pi u/b)$  имеем прямую пропорциональность, где  $u = \gamma a$ ,  $\gamma$  — относительный сдвиг в плоскости скольжения, касательное напряжение  $\tau = F_0 2\pi u \gamma / b^3$  ( $F = \tau b^2$ ). Найдем максимальную силу  $F_0 = Gb^3 / 2\pi a$  при сдвиге и соответствующее ей напряжение  $\tau_0 = F_0 / b^2 = bG / 2\pi a$ . Следовательно,  $\tau_{\max} = G / (2\pi)$ . При растяжении стержня наибольшие касательные напряжения возникают в площадках, наклоненных под углом  $45^\circ$  к оси образца.

Сила взаимодействия (отталкивания, сближения и сдвига) между каждой парой атомов приближенно записывается таким образом:  $F = A/r^m - B/r^n$  (здесь  $r$  — расстояние между атомами,  $A, B, m$  и  $n$  — показатели, постоянные для данного материала).

График зависимости силы  $F$  от расстояния между атомами  $r$  изображен на рисунке 4, c. Если расстояние между атомами становится равным  $r_1$ , то кристаллическая решетка разрушается, так как дальнейшее увеличение расстояния между атомами не требует увеличения силы. Рассмотренная *двухатомная модель* позволяет судить о свойствах кристаллической решетки. Процесс возникновения пластических деформаций связан со сдвигом *полос скольжения* на своего рода *квант деформаций*. В результате такого смещения каждый предыдущий атом занимает место последующего. В пределах одного кристалла образование пластических деформаций происходит в результате смещения части кристалла по некоторой плоскости на целое число элементов решетки (см. рисунки 1-3).

При переходе от реального материала к его модельной среде используются гипотезы сплошности (исключают наличие разрывов даже на микроуровне) и однородности (характеристики модельной среды в окрестности точки А такие же, как в окрестности точки В). В экспериментальных данных, полученных для представительного объема материала в виде кубов, призм, арматурных стержней, включается влияние всех неоднородностей и микротрещин. Именно для модельной среды и становится возможным использование аппарата высшей математики.

Тогда главные касательные напряжения определяются выражением [4, 10, 11]:

$$\tau^2 = \sigma_1^2(n_1^2 - n_1^4) + \sigma_2^2(n_2^2 - n_2^4) + \sigma_3^2(n_3^2 - n_3^4) - \sigma_1\sigma_2n_1^2n_2^2 - 2\sigma_2\sigma_3n_2^2n_3^2 - 2\sigma_3\sigma_1n_3^2n_1^2. \quad (1)$$

При этом требуется найти экстремум функции  $F(x, y, z, \lambda)$  при дополнительном условии  $\Phi(x, y, z) = 0$ . Отсюда составляют уравнение (2):

$$\frac{\partial F}{\partial x} + \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial z} + \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

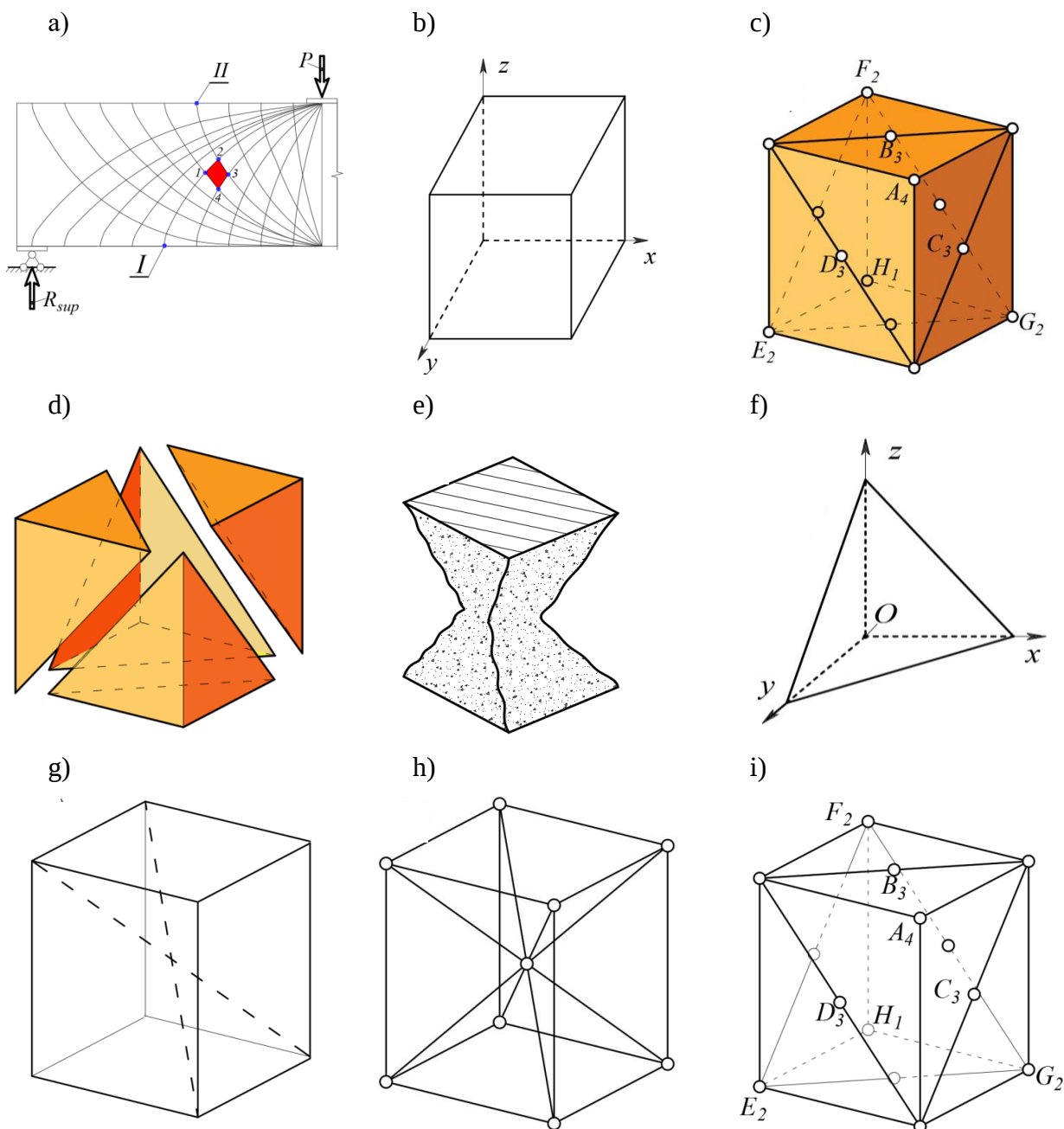


Рисунок 1 – Структура кристаллов: а) - распределение траекторий по сечению конструкции; б), с), d), e), f) - формы куба, призмы и пирамиды, соответственно; г) - атомная решетка сталь (феррита); h) - кубическая объемноцентрированная структура; i) - гранецентрированная кристаллическая структура

Роль функции  $F$  играет величина касательного напряжения  $\tau^2$  на той же площадке ( $\tau = \sqrt{S^2 - \sigma^2}$ , где  $Sn = \sigma_1 n_1^2 + \sigma_2 n_2^2 + \sigma_3 n_3^2$  - вектора для нормальных напряжений площадке на направление нормали). Тогда  $\Phi(n_1, n_2, n_3) = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 - 1$ . Дифференцируя  $\tau^2$  по  $n_1$ , получим (3):

$$\frac{\partial \tau^2}{\partial n_1} = 2\sigma_1 n_1 \left[ (1 - 2n_1^2)\sigma_1 - 2n_2^2\sigma_2 - 2n_3^2\sigma_3 \right] = 2\sigma_1 n_1 [\sigma_1 - 2\sigma]. \quad (3)$$

Дополнительное условие получаем из производной по  $n_1$ :  $\partial\Phi/\partial n_1 = 2n_1$ . Аналогично находятся производные по  $n_2$  и  $n_3$ . При этом  $\sigma = \sigma_1$ ,  $\lambda = \sigma_1^2$ . Отсюда  $n_1^2 = n_2^2 = 0,5$  и  $n_3 = 0$ , а также  $\sigma = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$ . При этом является справедливым уравнение  $\tau_{12} = \pm 0,5(\sigma_1 - \sigma_2)$ . Аналогично определяются экстремальные значения касательных напряжений на площадках, делящих пополам углы между плоскостями 21 и 31, 32 и 12:  $\tau_{23} = \pm 0,5(\sigma_2 - \sigma_3)$  и  $\tau_{31} = \pm 0,5(\sigma_3 - \sigma_1)$ . Очевидно, что  $\tau_{13}$  является наибольшим касательным напряжением, если  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Для чистого сдвига  $\operatorname{tg}(0,5\gamma) = 0,5\gamma$ , а с другой стороны,  $(1 + \varepsilon_1)/(1 + \varepsilon_2) = 1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \dots$ . Тогда с точностью до малых высшего порядка:  $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ .

Пластическое состояние зависит от тензора напряжений в целом. Здесь предположим, что существует функция в упругом и пластическом состоянии  $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \leq 0$ . Пластическая деформация каждого кристаллического зерна является сдвиговой, слои атомов скользят один относительно другого, однако в реальном материале расположены беспорядочно и переход затруднителен.

Представим в твердом теле всестороннее растяжение или сжатие. При этом все три главных напряжения (линейные деформации) изменяются на одну и ту же величину. Пластическая деформация происходит либо путем сдвига, либо отрыва. Сделаем некоторые заключения о функции напряжений  $f(\sigma_1 + q, \sigma_2 + q, \sigma_3 + q)$ . Производная этой функции по  $q$  равна нулю:  $\partial f / \partial \sigma_1 + \partial f / \partial \sigma_2 + \partial f / \partial \sigma_3 = 0$ .

При этом ищем общий интеграл этого дифференциального уравнения с частными производными. По общему правилу составляем обыкновенные дифференциальные уравнения ( $d\sigma_1 = d\sigma_2 = d\sigma_3$ ) и интегрируем их для трех возможных комбинаций:  $\sigma_1 - \sigma_3 = c_1$ ,  $\sigma_2 - \sigma_1 = c_2$ ,  $\sigma_3 - \sigma_2 = c_3$ . Здесь достаточно считать, что  $f$  зависит не от трех разностей главных напряжений (деформаций), а от двух, например  $c_1$  и  $c_2$ , так как  $c_3 = -c_1 - c_2$ .

Ряд авторов обнаружили предположение для простейших опытов стали. Однако разные материалы пока не соответствуют их опытам (пределу текучести при сдвиге). Наибольшее касательное напряжение  $\tau_{\max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) = k$  достигает предельного значения  $k$  (величина  $k$  представляет предел текучести при сдвиге в зависимости от давления) и их можно переписать для растяжения ( $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{pl}$ ).

**Октаэдрическое напряжение.** В теории пластичности наряду с главными плоскостями касательных напряжений существенное значение имеют плоскости, пересекающие главные оси под одинаковыми углами. Таких плоскостей можно провести восемь. Они образуют октаэдр и направляющие косинусы к нормали  $n_1 = n_2 = n_3 = 1/\sqrt{3}$  (см. рисунок 2). Вектор напряжения на передней грани -  $S = [\sigma_1 e_1 + \sigma_2 e_2 + \sigma_3 e_3] / \sqrt{3}$ , где  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  — единичные векторы главных осей. При этом среднее арифметическое из главных напряжений  $p$  называют гидростатическим напряжением на октаэдрической площадке  $\sigma = Sn = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 = p$ , где  $\sigma^2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 9$ .

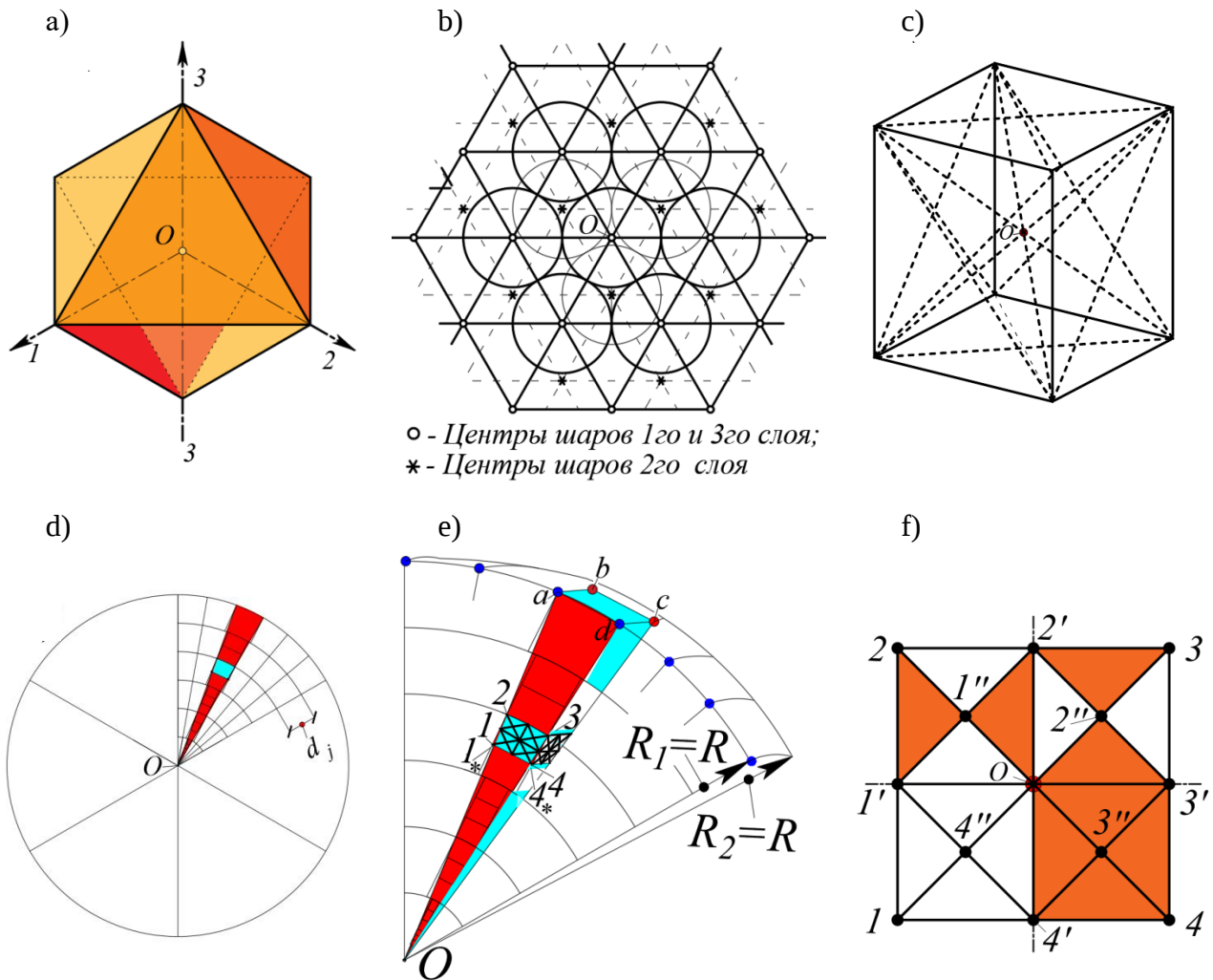


Рисунок 2 – Структура кристаллов материалов: а) - октаэдрическая структура, б) - гексагональная плотноупакованная структура, в) - кристаллическая решетка стали (аустенита), д) - шар из суммы секторов и уровней с ячейками структуры, е) - фрагмент отдельного сектора из уровней с ячейками структуры, ф) - «восьмерка» структуры для общей модели кристалла материалов

Для касательного напряжения на октаэдрической площадке имеем  $\tau^2 = 2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1]/9$ , а также интенсивность касательных напряжений  $\tau_0 = (1/3) \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ . Это выражение представляет собой среднее квадратичное из трех главных напряжений.

Для структуры кристаллов различных материалов разработана общая модель (см. рисунок 2, д, е, ф) на основе «восьмерки» и (из их различных сочетаний), призмы, - октаэдра и пирамиды (см. рисунок 1, г и рисунок 2, а, в). Пластическая деформации в монокристалле имеет механизм, где совершается сдвиг и скольжение слоев атомов в кубической решетке по определенным направлениям (см. рисунок 2). Для куба имеются внутренние октаэдрические двадцать четыре грани (см. рисунок 1, г) скольжения, которые заданы направляющими косинусами  $l = m = n = 1/\sqrt{3}$  для главных осей 1, 2, 3. В половине октаэдра изменяются геометрические размеры: высота  $0,707a$  (все призмы - тетраэдры),  $a$ ,  $0,5a$ ,  $0,707a$ ,  $0,3535a$  в плане из схемы на рисунке 2, а. Особенность всех треугольных граней - длина  $a$ . Тогда для разных граней можно записать плоскости скольжения используя направляющие косинусы  $1/\sqrt{3}$  или  $\sqrt{2}/2$  и матрицу ориентации углов -  $D_{\alpha,i}$ . При общем

суммирование направлений скольжения граней ( $n_* = 384$ ) через объемные секторы  $p_p$ , супер-секторы, а также уровни  $d_j$  (рисунок 2,d,e), получим:

$$\sum_{p=1}^p p_p \left\{ \sum_{q=1}^q q_q \left[ \sum_{s=1}^s s_s \left( \sum_{k=1}^k k_k \left( \sum_{n=1}^n 2n_n \right) \right) \right] \right\} \cdot D_{\alpha,i} = n_* \cdot D_{\alpha,i} = 384 \cdot p_p \cdot D_{\alpha,i}. \quad (4)$$

Здесь  $2n_n$  - внутренние октаэдрические двадцать четыре грани,  $k, s, q$  - разные три типа граней в призмах – тетраэдрах (см. рисунок 2,f);  $D_{\alpha,i}$  - матрица ориентации углов;  $p$  - приближение к шару, записанное через объемные секторы  $p$  (достаточно  $p=6$  супер-секторов), а также уровни  $d_j$  (достаточно  $j=6$ , рисунок 2,d,e).

*Энергетическая интерпретация* для фундаментальной роли теории пластичности используем выражение, принадлежащее В.В. Новожилову [11].

Вырежем мысленно в напряженном теле сферу бесконечно малого радиуса и вычислим среднее квадратичное значение касательного напряжения на поверхности сферы в правой части в формулы (4). В результате имеем соответствие (5):

$$\tau_* = \beta_\tau \cdot n_* \cdot D_{\alpha,i} = \sum_{p=1}^p p_p \left\{ \sum_{q=1}^q q_q \left[ \sum_{s=1}^s s_s \left( \sum_{k=1}^k k_k \left( \sum_{n=1}^n 2n_n \right) \right) \right] \right\} \cdot D_{\alpha,i} \approx \tau = \frac{1}{4\pi R^2} \int \tau^2 d\omega. \quad (5)$$

Здесь  $\beta_\tau$  — соответствующий коэффициент скольжения грани для обобщенной модели из формулы (4),  $R$  — радиус сферы,  $\tau$  — касательное напряжение, определяемое формулой (1),  $d\omega$  — элемент поверхности сферы;  $x, y, z$  — координаты точек сферы;  $n_1 = x/R$ ,  $n_2 = y/R$ ,  $n_3 = z/R$  - направляющие косинусы нормали к поверхности сферы.

Таким образом, октаэдрическое касательное напряжение с точностью до множителя равно среднему квадратичному значению касательного напряжения на поверхности бесконечно малой сферы.

Особого вида дефекты кристаллической решетки, называют *дислокациями*. Движение дислокаций сопровождается динамическими эффектами. Атомы приобретают кинетическую энергию и совершают колебания около вновь приобретенного положения равновесия.

Представим себе, что кристалл разрезан между соседними рядами сетки атомов от точки  $C$  и в этот разрез вставлен лишний слой атомов. Такая искаженная кристаллическая решетка на достаточном расстоянии от центра  $C$  изображена на рисунке 3. Дислокацию обозначим на чертеже черточкой (—) и знаком в виде перевернутой буквы  $\perp$  (дислокация считается положительной). При отрицательной дислокации разрез делается снизу буквой  $T$  и вводится лишний слой атомов.

На рисунке 3 показаны различные способы создания положительной и отрицательной дислокации (случаи  $b, g$ , а также случаи сдвигов  $c, e$ ). В кристаллической решетке всегда существуют точечные дефекты, а именно внедренные атомы и вакансии, то есть пустые места в решетке. Для вертикальных движений дислокаций (см. разрез  $b$ ) невозможны без нарушения сплошности материала. Горизонтальное движение дислокаций, наоборот, не связано с нарушением сплошности и поэтому всегда кинематически возможно.

Единственным линейным размером, связанным с дислокацией, является величина смещения краев разреза. Эту величину называют вектором Бюргерса [12] и обозначают через  $b$  ( $b_x, b_y, b_z$ , - по оси). Размерность энергии дислокации  $W$ , приходящейся на единицу длины, имеет размерность силы (здесь упругие свойства материала характеризуются одной размерной упругой постоянной, например модулем сдвига  $G$ ). Единственная комбинация из  $G$  и  $b$ , имеющая размерность силы, будет  $W = kGb^2$  (точной оценкой является  $k=0,5$ ).

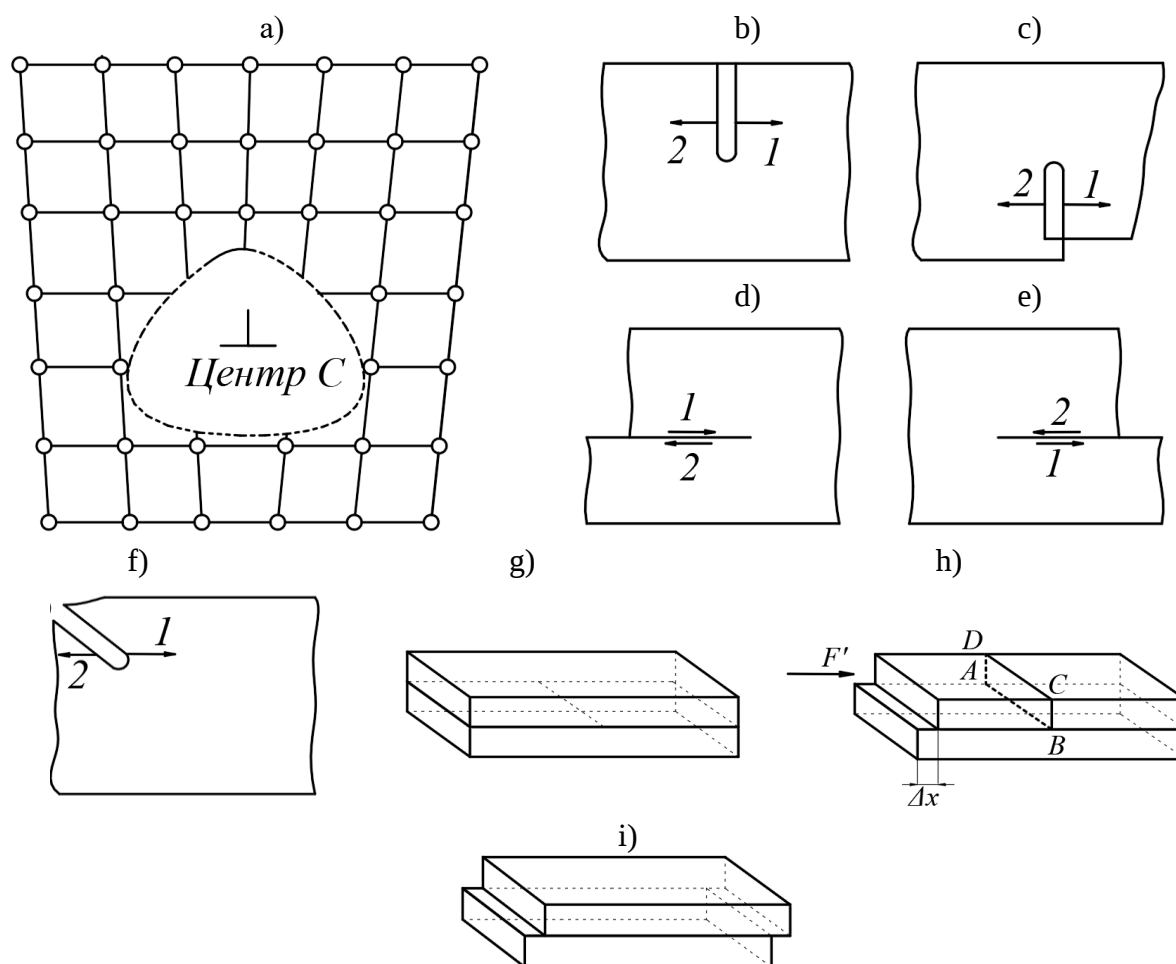


Рисунок 3 – Схема процесс образования дислокаций в кристаллической решетке:  
а) - центр  $C$  в кристаллической решетке, б-ф) - виды положительной дислокации,  
г-и) - образование краевой дислокации

Рассмотрим две положительные дислокации в одной плоскости скольжения (см. рисунок 4). Если эти дислокации достаточно удалены друг от друга, они практически не взаимодействуют между собой и общая энергия двух дислокаций равна сумме их энергий, то есть  $2kGb^2$ . Когда расстояние между дислокациями станет равно нулю, они сольются в одну дислокацию с удвоенным вектором Бюргерса, энергия которой равна  $4kGb^2$ . Дислокации двигаются под действием внешних сил, вызывающих в теле напряженное состояние, что и является причиной пластической деформации.

Имеется еще одна категория сил для энергетического барьера препятствующих движению дислокаций, которые называются силами Пайерлса [12, 13].

Механизмы источника порождения новых дислокаций наружу нужно ввести понятие о краевых дислокациях или это замкнутая линия краевой дислокации является произвольной пространственной кривой, уходящей двумя концами (рисунок 4) в бесконечность. Дислокация лежит в плоскости возможного сдвига для кристалла и параллельна вектору Бюргерса, где элемент  $pq$  - линии которые изгибается по некоторой кривой (рисунок 4,г).

Чтобы определить форму этой кривой, мы применим к равновесию дислокации принцип возможных перемещений, справедливый для любой механической системы. Линии

дислокации перемещение  $ds$  в направлении нормали, и элемент  $ds$  займет положение  $ds'$  и  $\rho$  — радиус кривизны (см. рисунок 4, h). На заштрихованной площади  $ds \cdot \delta u$  произошло дополнительное смещение сторон разреза на величину вектора Бюргерса. При этом необходимо преодолеть сопротивление от действующих в плоскости скольжения касательных напряжений, то есть затратить работу  $\tau b ds \delta u$ . Элемент  $ds'$  больше, чем элемент  $ds$ , на величину  $\delta ds$ . Из рисунка видно, что  $\delta ds = (\delta u / \rho) ds$  и энергия дислокации на единицу длины увеличилась на  $W(\delta u / \rho) ds$ . Приравнивая эту величину к работе касательных напряжений, получим (6):

$$\tau b ds \delta u = \frac{W}{\rho} ds \delta u \quad (6)$$

Отсюда следует, что линия дислокации является окружностью, проходящей через точки  $p$  и  $q$  и энергия на единицу длины произвольной краевой дислокации определяется с достаточной степенью точности формулой  $W = 0.5Gb^2$  (7):

$$\tau = \frac{W}{b\rho} = \frac{bG}{\rho} \quad (7)$$

Обращаясь к рисунку 4, имеем  $l$  — расстояние  $pq$ , то есть длина источника дислокаций и минимальный радиус окружности, проходящий через точки  $p$  и  $q$ . Отсюда максимальное критическое значение  $\tau_{crit}$  будет равно:

$$\tau_{crit} = \frac{Gb}{l} \quad (8)$$

Если внешнее напряжение сдвига (угловые деформации) меньше критического, являющаяся результатом перемещения линии дислокации то они обратимы и исчезнут при снятии нагрузки. Наличие источников понижает модуль сдвига материала (упругая постоянная), а в результате пластической деформации, увеличивается число дислокаций. Когда касательное напряжение достигает критического значения, равновесие дуги дислокации становится неустойчивым, эта дуга неограниченно расширяется. Макроскопический срыв дислокации представляет собою сдвиг на величину вектора Бюргерса.

Уравнение равновесия линии дислокации имеет тот же вид, что и уравнение равновесия гибкой нити с постоянным натяжением  $W$ , нагруженной постоянным давлением, нормальным к нити в каждой точке и равным произведению  $\tau b$ . После достижения критического напряжения дуга дислокации будет неограниченно расширяться (причем радиус ее кривизны увеличивается). Рост дислокации носит динамический характер, а движение линии дислокации встречает сопротивление, увеличивающееся с увеличением скорости, поэтому середина дуги дислокации будет двигаться медленнее, а ее концы — быстрее. Кривая перестанет быть дугой окружности и сплющится. В конце концов кривая коснется сама себя в точке  $M$ . Отрезки  $mn$  и  $m'n'$  линии дислокации могут рассматриваться, как прямолинейные отрезки, в момент касания они сольются.

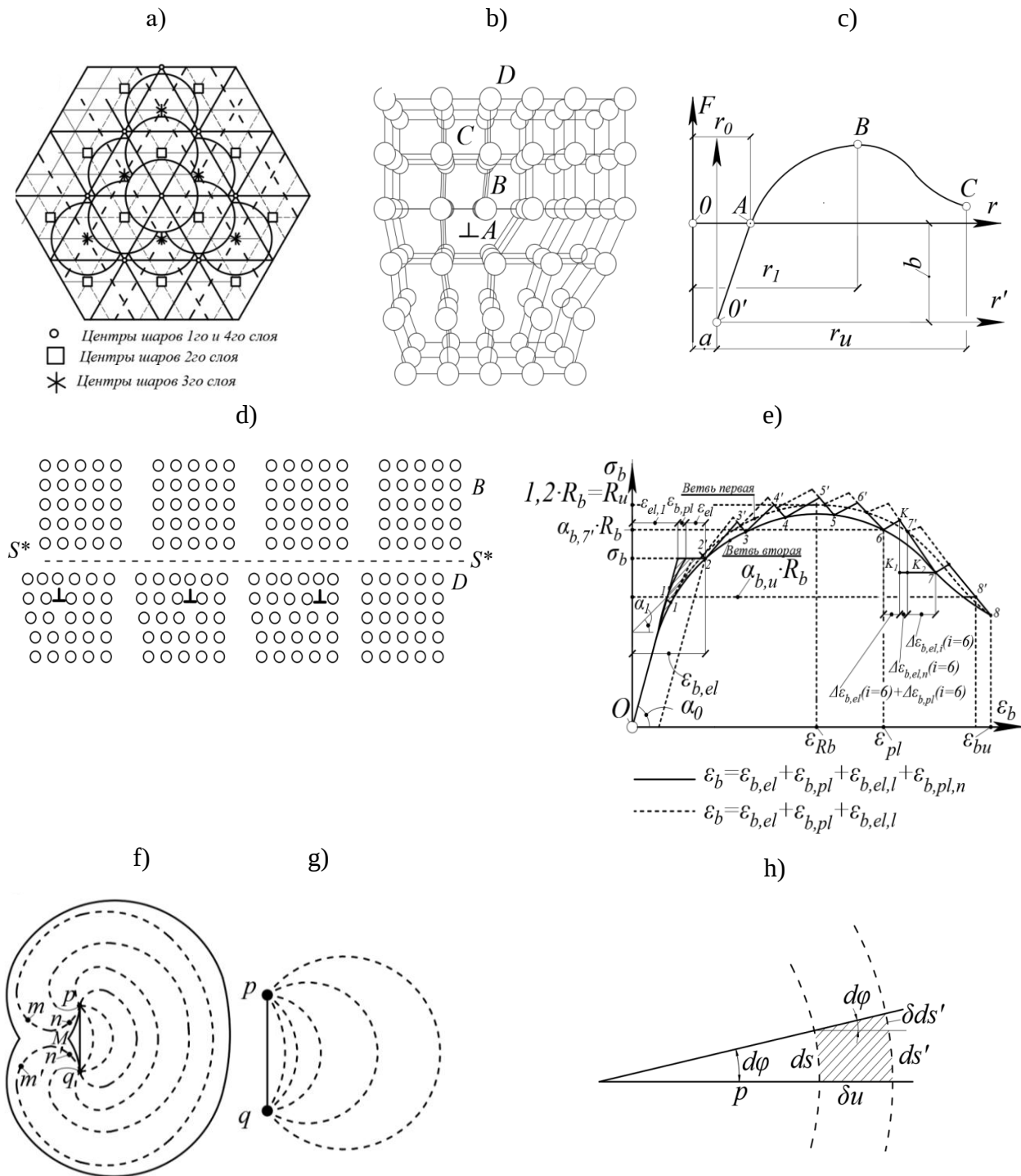


Рисунок 4 – Структура деформаций и дислокаций:

а) - кубическая объемноцентрированная структура; б) - объемная краевая дислокация, вызванная внешней атомной плоскостью ABCD; в) - двухатомная модель зависимости силы от расстояния между атомами, д) - плоскость скольжения при краевой дислокации; е) - диаграмма бетона, зависимость напряжений от деформаций  $\sigma_b - \epsilon_b$  при кратковременном режиме нагружения, ф, г) - форма движения криволинейной дислокации для силы Пайерлса и модели Франка - Риды, h) - радиус кривизны дислокации

В результате образуется замкнутое кольцо дислокации (криволинейная дислокация на рисунке 4 показана сплошными линиями). Кольцо под действием «давления»  $\tau b$  немедленно примет круговую форму и будет продолжать неограниченно расширяться, (затем очевидно

выпрямится, снова выгнется вправо, и весь процесс будет повторяться неограниченное число раз). Один источник может породить любое количество кольцевых дислокаций. Каждый выход из них на поверхность означает сдвиг на величину вектора Бюргерса или одного межуатомного расстояния. Приведенная модель носит название модели Франка — Рида [14], которая описывает неограниченную пластическую деформацию кристалла, не содержащего примесей и имеющего минимальное количество внутренних дефектов.

Формула (8) дает величину предела текучести для данного кристалла. В действительности кольца дислокаций не имеют возможности расширяться неограниченно: в реальном кристалле всегда имеются препятствия для движения дислокаций.

Таким образом, если дислокации не имеют возможности свободно выходить на поверхность, а задерживаются препятствиями, источник может породить лишь определенное число дислокаций, и им соответствует определенная конечная пластическая деформация.

Для рассмотрения дислокаций из кристалла вырезана полоса конечной толщины. В направлении плоскостей возможного скольжения на вертикали  $Oy$  помещен ряд краевых дислокаций на равных расстояниях  $d_i$  (рисунок 5). Две половины полосы, разделенные вертикальным рядом дислокаций, будут повернуты одна относительно другой на угол, равный отношению  $b/d$  и отличаются ориентировкой кристаллографических плоскостей. В результате пластической деформации дислокаций, являющихся относительно свободными (область\*, рисунок 5,а), то есть удерживаемыми незначительными препятствиями и разного рода силами сопротивления, такими устойчивыми конфигурациями являются стенки дислокаций. Процесс образования стенок называется полигонизацией (рисунок 5а, б). Этот процесс наблюдается, например, при ползучести материалов. Дислокации в этом месте накапливаются.

### Результаты и обсуждение.

Анализ приведенных физических явлений показывает, что процесс разрушения имеет в своей основе два взаимообусловленных и взаимоконкурирующих механизма, “борющихся” за право разрушить образец. **Первый** механизм - образование пластических деформаций путем сдвига по определенным кристаллографическим плоскостям. **Второй** - образование и развитие трещин с последующим разрывом. Иногда верх берет первый механизм, иногда - второй. Несколько непосредственно соседствующих дислокаций — это уже микротрещина, которая по мере увеличения растягивающих напряжений способна начать расширяться.

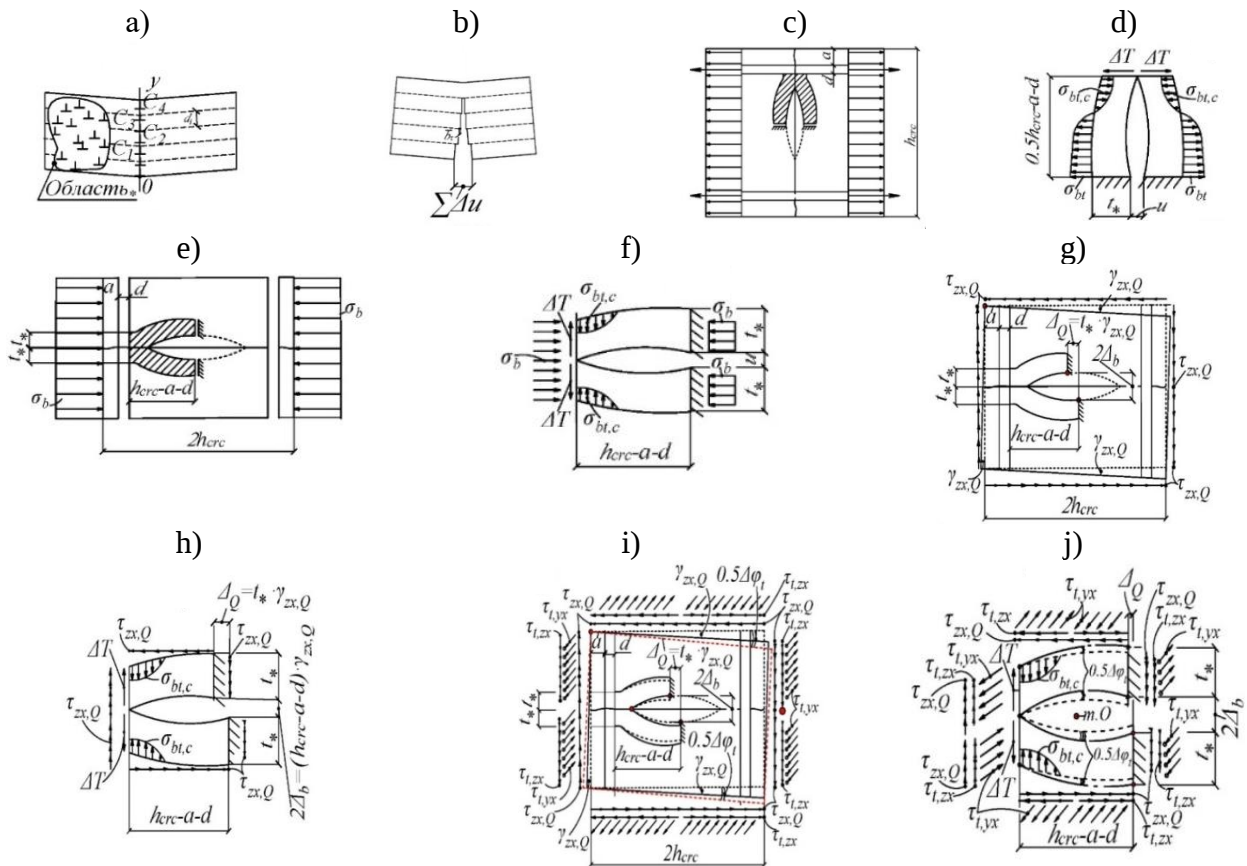
В структуре материала возможно существование **микротрещин**, где присутствуют угловые деформации и напряжения сдвига (рисунок 5,и) (9):

$$\Delta_{crc,micro} = \sum_{i=1}^n b_{\tau} \quad (9)$$

Здесь  $b_{\tau}$  - касательный вектор Бюргерса;  $n$  - количество касательных векторов на участке расстояния микротрещин  $l_{crc,micro}$  и граней общей модели (рисунок 5,ф).

Ширина раскрытия микротрещин при линейных деформациях (см.рисунок 5,а, б) (10):

$$a_{crc,micro} = \sum_{i=1}^n u = \sum_{i=1}^n b_{\tau} \cdot d_i \quad (10)$$



**Рисунок 5 – Структура материала в месте накопления полигонизаций - первый механизм, а также образование и развитие микротрещин с последующим разрывом - второй механизм:**

- а) - пластическая деформация области\* свободных краевых дислокаций;**  
**б) - устойчивые конфигурации дислокации стенки для сопротивления двухконсольных элементов из железобетонной конструкции, с, d) - растянутых; е, f) - сжатых, g, h) - сдвига, i, j) - кручения**

Здесь  $d_i$  - толщина слоя (рисунок 5,а);  $n$  - количество касательных векторов по высоте микротрещин  $h_{crc,micro}$  и граней общей модели (рисунок 2,ф).

При этом для магистральных трещин в механике разрушения железобетона предложено использовать двухконсольные элементы [1, 3-9]. Здесь уточнены двухконсольные элементы для растяжения (рисунок 5 с-d), сжатия (рисунок 5,е-f), поперечного сдвига (риунок 5,g-h) и кручения при угловой деформации (рисунок 5,i-j). В Соответственно в макром мире из магистральных трещин через внутренние параметры в окрестности макротрещины получены, - угловые  $\Delta_{crc,micro}$  и линейные деформации, ширина раскрытия  $a_{crc}$ , развитие высоты трещины  $h_{crc}$  и другие.

Реальные материалы, в том числе металлы, состоят из большого количества кристаллических зерен, ориентировка которых случайна. Применяемые в технике металлы обычно не являются чистыми, а представляют собою сплавы, кристаллы которых содержат атомы различных компонентов.

Простейшим типом сплавов являются твердые растворы замещения, которые могут образовываться в произвольных пропорциях, если атомные радиусы, отличаются друг от друга не более чем на 15%. После закалки производят отпуск, в результате чего мартенсит частично распадается на устойчивые фазы — феррит и цементит, что определяет твердость и прочность. Назначая режим термической обработки, можно сообщать стали желаемые свойства и возможность пластической деформации.

Кривые на рисунке 4,е представляют собой действительные диаграммы сжатия бетона (при решении одних задач предпочтения заслуживает первая модель – кривая 1, при решении других – вторая – кривая 2). Бетон, как всякий другой материал, отражается на диаграмме сжатия и растяжения с постоянной скоростью увеличения напряжений (перемещений для ползучести, релаксации напряжений, краевой дислокации), где наибольший интерес представляют два режима – условно-мгновенный и кратковременный стандартный [15-20]. Ступенчатая линия на рисунке 4,е отражает реальный процесс деформирования сжатого бетонного образца — призмы при постепенном росте нагрузки с выдержкой на каждой ступени. При достаточно большом количестве ступеней зависимость можно изобразить плавной кривой. В другом случае с ростом напряжений кривизна диаграммы увеличивается, хотя явно выраженная нелинейность проявляется значительно позже. Полные деформации при мгновенном режиме нагружения состоят из двух частей: упругой, полностью обратимой, и неупругой, полностью необратимой, а также при кратковременном режиме нагружения состоит из трех частей: неупругих деформаций, возникающих за время выдержек на ступенях нагружения и называемых деформациями быстрой ползучести бетона.

До нижней условной границы микротрещинообразования наблюдаются в основном упругие деформации, обусловленные деформациями ползучести бетона (накладываются деформации), вязкостью гелевой структуры составляющей цементного камня и явлениями, протекающими в твердеющем бетоне (линейная составляющая, не влияющая на сопротивление бетона). Таким образом, полные деформации для каждой ступени  $\Delta \varepsilon_b$  могут быть представлены как сумма  $\Delta \varepsilon_{b,el} + \Delta \varepsilon_{b,pl}$ . Нагружение должно вычисляться, как линейная составляющая ползучести. Достаточно наглядно указанная модель может быть проиллюстрирована для случая осевого сжатия на диаграмме  $\sigma_b - \varepsilon_b$  (график сознательно сплошен). В соответствии с этой диаграммой кратковременные испытания при приложении нагрузки ступенями означают, что после очередной ступени нагружения и отвечающего ему приращения деформаций с одновременным падением нагрузки (отрезок  $K_i$  деформации линейной ползучести) в конце выдержки нелинейно снимаются путем соответствующего догружения образца (отнесенные к указанному объему) остаются постоянными равными примерно  $R_i$ . Для аналогичной диаграммы  $N - \varepsilon_b$ , вершина отвечает силе  $N$ , равной  $E_b \varepsilon A_b$ , где  $A_b$  - площадь усреднённого сечения «работающего» объема образца на ступени нагружения. Крайняя точка на ниспадающем участке соответствует силе  $N = (0.5 - 0.7) N_{\max}$  при разрушении образца, а отрезок на оси абсцисс – относительной деформации предельной сжимаемости бетона.

Столь же правомерной может считаться и другая – более привычная – модель в виде диаграммы  $\varepsilon_b - \sigma_b$ , основанная на снижении предельного сопротивления бетона (за счет нарушения структуры) по мере нагружения образца в зоне неустойчивого деформирования при его работе. Принципиальное отличие диаграммы, показанной на рассматриваемом рисунке, от используемой в нормативных документах, заключается в том, что в данном случае под напряжениями  $\sigma_b$  на ниспадающем участке диаграммы принимают напряжения, релаксирующие в процессе нагружения. Уменьшение напряжений в бетоне где разрушение носит «отрывной» характер (явление противоестественное), и предельное сопротивление бетона равно  $\alpha_i R_b$  (коэффициент снижения призмочной прочности  $\alpha_i$  на  $i$ -й ступени в пределах  $\alpha = 0,5 - 0,7$ ),  $\varepsilon_b = \varepsilon_{b,u}$ .

Минимальные (чистый сдвиг - *pure shear*) касательные напряжения получены из одноосевого растяжения  $\tau_{\min} = 1.2R_{bt} / 2$ , а максимальные - из сжатия  $\tau_{\max} = R_u / 2 = 1.2R_b / 2$ . При этом критическая интенсивность напряжений (октаэдрических) для скольжений плоскостей также определена в виде  $\tau_i = 0,6R_{bt}$ . При этом критическая интенсивность напряжений (октаэдрических) для скольжений плоскостей также определена в виде  $\tau_i = 0,6R_{bt}$ .

Протяженные и пологие нисходящие ветви деформирования при постоянной скорости деформирования характерны для менее однородных бетонов с более ранним образованием микротрещин, но, вместе с тем, и большим сопротивлением их распространению и превращению в магистральные трещины. Аналогичные диаграммы более однородных бетонов искривлены слабее, их нисходящая ветвь падает круче, а разрушение носит более хрупкий характер.

Полные (с ниспадающими участками) диаграммы сжатия и растяжения имеют важное значение, как с теоретической, так и с практической точки зрения. Первая реализуется в сжатых зонах статически определимых и статически неопределимых конструкций на подходе к разрушению, вторая – в растянутых зонах перед исчерпанием сопротивления образованию трещин.

Характер деформирования бетона на ниспадающем участке весьма чувствителен к режиму нагружения (см. рисунок 4,е). Бетон на этом участке претерпевает значительные микро- и макроразрушения, ориентированные (в основном) при сжатии — вдоль линии действия усилия, при растяжении — поперек. Деформации бетона, характеризующие разрушение образца, зависят от прочности бетона, его состава, плотности и скорости деформирования.

В структуре материала (бетона) применение более однородной смеси без крупного заполнителя приводит к повышению границ микротрещинообразования. Для лёгких бетонов по сравнению с тяжелыми эти границы также повышаются, так как сцепление цементного камня и растворной части с пористым заполнителем лучше, чем с плотным (в современной чувствительной аппаратуре при испытаниях в подтверждение этому возникают акустические эффекты). Для тяжелых бетонов, в относительно зрелом возрасте (более 28 суток) зависимость параметров трещинообразования от прочности бетона  $R_b$ , в пределах 10... 100 МПа может быть принята в виде (11), (12):

$$R_{crc}^0 / R_b = 0.35 \lg R_b - 0.15, \quad (11)$$

$$R_{crc}^V / R_b = 0.35 \lg R_b + 0.175. \quad (12)$$

Поскольку процесс структурных изменений существенно зависит от времени, изменение скорости нагружения отражается на его интенсивности. Причем с увеличением скорости нагружения границы микротрещинообразования ( $v_{sound}$ ) повышаются.

В бетоне для деформации микротрещины  $\varepsilon_{crc,0}$  можно записать:

$$\varepsilon_{crc,0} = (0.35 \lg R_b - 0.15) \cdot R_b / E_b. \quad (13)$$

Для энергии центральной области из стандартной призмы следуя формуле (13) получим (14):

$$E_{crc,0} = 0.5 \cdot \varepsilon_{crc,0} \cdot R_{crc}^0. \quad (14)$$

Скорость нагружения границы микротрещинообразования имеет вид (15):

$$v_{sound} = (R_{crc,0} \cdot \varepsilon_{crc,0} / m)^{0,5}. \quad (15)$$

Здесь  $m$  - масса бетона для представительного объема куба (в центральной области из стандартной призмы).

В качестве условия прочности бетона используется предельное значение интенсивности касательных напряжений ( $T_s$ ). Для рассматриваемого вида напряженного состояния примем условие из работы [15]:

$$T_s = T_c k(\lambda, \delta) \quad (16)$$

Здесь  $k(\lambda, \delta)$  - коэффициент изменения предельного значения интенсивности касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния по сравнению с предельным значением при чистом сдвиге ( $T_c$ );  $e = R_c R_p / (3T_c^2) - 1$  (для бетона отношение  $R_c / R_p$  равно примерно 10);  $\delta = e(S/T)^3$ ;  $S$  - инвариантная величина, третья степень которой с точностью до постоянной совпадает с третьим инвариантом девиатора напряжений  $I_{D3}$ ;  $T$  - значение интенсивности касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния;  $f = 3T_c(R_c - R_p)/(R_c R_p)$ ;  $\lambda = f\sigma/T$  - коэффициент, связанный с величиной среднего напряжения;  $\sigma = \sigma_s = \lambda k(\lambda, \delta)H$  - предельное значение напряжения  $\sigma = \sigma_s$ ;  $H = T_c / f$  - предел прочности при всестороннем растяжении.

В качестве условия прочности бетона предельное значение интенсивности касательных напряжений  $T_s$  для рассматриваемого вида напряженного состояния примем выражения предложенное профессором Г.А. Гениевым, а также модель рассмотренную здесь для структуры кристаллов различных материалов.

Еще одним важным вопросом остается вопрос о модуле дилатации, который определяется соотношением [15]:

$$g_0 = -\frac{\theta_c}{\Gamma_c^2} \quad (17)$$

Здесь,  $\theta_c$  — предельная объемная деформация при чистом сдвиге;  $g_0 > 0$ , поскольку  $\theta_c < 0$ ;  $\Gamma$  — интенсивность деформаций сдвига, то есть  $\Gamma = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$  и  $\Gamma_c$  — предельная интенсивность деформаций при чистом сдвиге.

Тогда построим модель нагружения от первой до третьей стадий напряженно-деформированного состояния для ветви D – сжатие бетона: точка 1, -  $\zeta_1 = \zeta_{crc,0}$ ,  $g_1 = g_{crc,0}$ ; точка 2, -  $\zeta_2 = \zeta_R$ ,  $g_2 = g_R$ ; точка 3, -  $\zeta_3 = \zeta_u$ ,  $g_3 = g_u$ ) в виде параболы для функции модуля дилатации:

$$g\left(\frac{\theta}{\Gamma^2}\right) = g(\zeta) = A\zeta^2 + B\zeta + C. \quad (18)$$

Здесь обозначим  $\zeta = \theta / \Gamma^2$ ;  $g(\zeta)$  - функция модуля дилатации от первой до третьей стадий напряженно-деформированного состояния;

$$A = \frac{g_u - \frac{\zeta_u(g_u - g_{crc,0}) + \zeta_R \cdot g_{crc,0} - \zeta_{crc,0} \cdot g_R}{\zeta_R - \zeta_{crc,0}}}{\zeta_u(\zeta_u - \zeta_{crc,0} - \zeta_R) + \zeta_{crc,0} \cdot \zeta_R};$$

$$B = \frac{g_R - g_{crc,0}}{\zeta_R - \zeta_{crc,0}} - \frac{g_u(\zeta_R + \zeta_{crc,0}) - \frac{\zeta_u(g_R - g_{crc,0}) + \zeta_R \cdot g_{crc,0} - \zeta_{crc,0} \cdot g_R}{\zeta_R - \zeta_{crc,0}}(\zeta_R + \zeta_{crc,0})}{\zeta_u(\zeta_u - \zeta_{crc,0} - \zeta_R) + \zeta_{crc,0} \cdot \zeta_R};$$

$$C = \frac{\zeta_R \cdot g_{crc,0} - \zeta_{crc,0} \cdot g_R}{\zeta_R - \zeta_{crc,0}} + \zeta_{crc,0} \cdot \zeta_R - \frac{g_u - \frac{\zeta_u(g_u - g_{crc,0}) + \zeta_R \cdot g_{crc,0} - \zeta_{crc,0} \cdot g_R}{\zeta_R - \zeta_{crc,0}}}{\zeta_u(\zeta_u - \zeta_{crc,0} - \zeta_R) + \zeta_{crc,0} \cdot \zeta_R}. \quad (19)$$

При этом, для стадии II НДС  $g(\zeta)$  в точке 2 ( $\sigma_b = R_b$ ,  $\varepsilon_b = \varepsilon_{b,R}$  и  $\sigma_{bt} = R_{bt}$ ,  $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{bt,R}$ ) соответствует  $g_0$  для формулы (17):

$$g(\zeta_R) = A_f \zeta_R^2 + B_f \zeta_R + C_f = g_0 = -\frac{\theta_c}{\Gamma_c^2}. \quad (20)$$

Здесь  $A_f$ ,  $B_f$ ,  $C_f$  - коэффициенты определяемые по формуле (19).

Аналогично в области для ветви t – растяжение бетона от первой до третьей стадий напряженно-деформированного состояния получим: для точки 1<sub>t</sub>, -  $\zeta_{1,t} = \zeta_{crc,0,t}$ ,  $g_{1,t} = g_{crc,0,t}$ ; точки 2<sub>t</sub>, -  $\zeta_{2,t} = \zeta_{R,t}$ ,  $g_{2,t} = g_{R,t}$ ; точки 3<sub>t</sub>, -  $\zeta_{3,t} = \zeta_{ul,t}$ ,  $g_{3,t} = g_{u,t}$  и другие функции модуля дилатации для областей сжатие – растяжение, сжатие – сжатие, растяжение – растяжение.

Для формулы (18) и аналогично формулы (20), соответственно, получим тождество (21):

$$g(\zeta_R) = g_0. \quad (21)$$

Зависимость «деформации-напряжения» имеет дополнительное слагаемое с модулем ее дилатации  $g_0$  (или  $g(\zeta)$ ) и коэффициентом поперечных деформаций  $\nu$  (22):

$$\nu = 0,5 \cdot \frac{1 - 2G_0 / (3K_0)}{1 + 2G_0 / (3K_0)}. \quad (22)$$

Здесь  $E_0$  – начальный модуль деформаций бетона;  $E(\Gamma)$  – модуль упругости в узловых точках сетки на каждом шаге, -  $E(\Gamma) = 3G(\Gamma) / (1 + G_0 / (3K_0))$ ;  $K_0$  – начальный модуль объемного сжатия бетона;  $K$  – модуль объемного сжатия бетона, -  $K(T) = 0.5K_0(1 + \sqrt{1 - T/T_s})$ ;  $T$  – интенсивность касательных напряжений;  $G_0$  – начальный модуль сдвига;  $G(T)$  – модуль сдвига, -  $G(T) = E(\Gamma) \cdot (1 + G_0 / (3K_0)) / 3 = T / \Gamma = G_0(1 + \sqrt{1 - T/T_s}) / 2$ .

### Выводы.

1. Для структуры кристаллов различных материалов разработана общая модель на основе «восьмерки» из различных сочетаний призм-тетраэдров в которой имеются внутренние октаэдрические и чистые сдвиги плоскостей скольжений. При этом в теле в форме шара вычисляется значения касательных напряжений, записанное через их суммирование в объемных секторах в их нескольких радиус-уровнях шара.

2. Минимальные (чистый сдвиг - *pure shear*) касательные напряжения получены из одноосного растяжения  $\tau_{\min} = 1.2R_{bt} / 2$ , а максимальные - из одноосевого сжатия

$\tau_{\max} = R_u / 2 = 1.2R_b / 2$ . При этом критическая интенсивность октаэдрических напряжений для скольжений плоскостей также определена в виде  $\tau_i = 0,6R_{bt}$ .

3. Показано, что процесс разрушения материала имеет в своей основе два взаимообусловленных и взаимоконкурирующих механизма. *Первый* механизм - образование пластических деформаций путем сдвига по определенным кристаллографическим плоскостям. Второй - образование и развитие трещин с последующим разрывом. В структуре кристаллов различных материалов рассматриваемой общей модели возможно существование микротрещин.

4. Для лёгких бетонов по сравнению с тяжелыми границы трещинообразования повышаются, так как сцепление цементного камня и растворной части с пористым заполнителем лучше, чем с плотным заполнителем. Процесс структурных изменений бетона, существенно зависящий от времени, изменение скорости звука ( $v_{\text{sound}}$ ) отражается на его границе микротрещинообразования -  $R_{crc}^0$ ,  $R_{crc}^v$ , деформациях  $\varepsilon_{crc,0}$  и энергии центральной области стандартной призмы -  $E_{crc,0}$ , а также массе  $m$  бетона представительного объема куба в центральной области стандартной призмы.

5. Для магистральных трещин в механике разрушения железобетона (макромасштабе) уточнены двухконсольные элементы растяжения, сжатия, поперечного сдвига и кручения и для внутренних параметров в окрестности макротрещины получены угловые  $\Delta_{crc,micro}$  и линейные деформации, ширина раскрытия  $a_{crc}$ , и высота развития трещин  $h_{crc}$ .

6. Для используемого в общей модели модуля дилатации бетона, определяемого соотношением профессора Г.А. Гениева (предельная объемная деформация и предельная интенсивность деформаций чистого сдвига) дано определение внутренних параметров в окрестности макротрещины и для модуля дилатации построена функция  $g(\zeta)$  отражающая нагружение на первой  $g_{crc,0}$ , второй  $g_R$  и третьей  $g_u$  стадиях напряженно-деформированного состояния. Получена аналитическая зависимость для коэффициента поперечных деформаций  $\nu$  бетона при различных уровнях его нагружения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 472 с.
2. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. К.: Основа. 2009. 432 с.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
4. Верюжский Ю.В., Голышев А.Б., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Лисицин Б.М., Машков И.Л., Яковенко И.А. Справочное пособие по строительной механике. В двух томах.: Учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2014. 432 с.
5. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №8. С. 16–23. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.08.16-23>.
6. Верюжский Ю.В., Колчунов В.И. Методы механики железобетона. Учебное пособие. К.: Книжное издательство НАУ, 2005. 653 с.
7. Баширов Х.З., Колчунов В.И., Федоров В.С., Яковенко И.А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. М.: АСВ, 2017. 248 с.
8. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетонных конструкций, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях (монография). Киев: Основа. 2010. 286 с.
9. Голышев А.Б., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях. Киев: Талком, 2015. 371 с.
10. Петров В. В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 480 с.

11. Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения // Прикладная математика и механика. 1958. №1. С.78–89.
12. Бараз В.Р., Левченко В.П., Повзнер А.А. Строение и физические свойства кристаллов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 164 с.
13. Остаповец А., Пайдар В. Оценка напряжения Пайерлса для граничных дислокаций // Физика металлов и металловедение. 2011. № 3. С. 235-241.
14. Благовещенский В.В., Панин И.Г. Исследование модели дислокационного источника Франка-Рида // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2012. №1. С. 40-45.
15. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М: Стройиздат, 1974, 316 с.
16. Митасов В.М., Стаценко Н.В. Особенность развития трещин в железобетонных балках с организованными трещинами // Политранспортные системы. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения. 2020. С. 230-235.
17. Митасов В.М. Образование и развитие стохастических трещин в хрупких и квазихрупких материалах (на примере железобетонных конструкций) // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-24-2018). Томск: Издательство Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. С. 105-109.
18. Петров В.В., Селяев П.В. Инкрементальная модель взаимодействия нелинейно деформируемых материалов с агрессивными средами // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. 2014. С. 145-151.
19. Петров В.В. Методы выделения главной части решения при расчете нелинейно деформируемых балок // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №3(61). С. 160-169.
20. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2004. 216 с.

## REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation models of the force resistance of reinforced concrete. M.: ASV, 2004. 472 p.
2. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Reinforced concrete resistance. K: Osnova. 2009. 432 p.
3. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroyizdat, 1996. 410 p.
4. Veryuzhsky Yu.V., Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Lisitsin B.M., Mashkov I.L., Yakovenko I.A. Reference manual on structural mechanics. In two volumes.: Textbook. M.: ASV, 2014. 432 p.
5. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Conceptual hierarchy of models in the theory of resistance of building structur. Industrial and civil engineering. 2020. №8. Pp. 16–23.
6. Veryuzhskij YU.V., Kolchunov V.I. Methods of mechanics of reinforced concrete. K.: NAU, 2005. 653p.
7. Bashirov H.Z., Kolchunov V.I., Fedorov V.S., Yakovenko I.A. Reinforced Concrete Composite Structures of Buildings and Structures. M.: ABC, 2017. 248 p.
8. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete structures erected in complex engineering and geological conditions. Kiev: Osnova. 2010. 286 p.
9. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in complex engineering and geological conditions. Kiev: Talkom, 2015. 371 p.
10. Petrov V.V. Nonlinear incremental structural mechanics. Moscow: Infra-Engineering, 2014. 480 p.
11. Kadashevich Yu.I., Novozhilov V.V. The theory of plasticity, taking into account residual microstresses // Applied mathematics and mechanics, 1958. №1. Pp.78-89.
12. Baraz V.R., Levchenko V.P., Povzner A.A. Structure and physical properties of crystals Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2009. 164 p.
13. Ostapovets A., Paydar V. Evaluation of Pyerls stress for boundary dislocations // Physics of Metals and Metal Science. 2011. № 3. Pp. 235-241.
14. Blagoveschensky V.V., Panin I.G. study of Frank–Read dislocation source model // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materials of Electronics Engineering. 2012. №1. Pp. 40-45.
15. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Theory of Plasticity of Concrete and Reinforced Concrete. M: Stroyizdat, 1974, 316 p.
16. Mitasov V.M., Statsenko N.V. Peculiarities of Cracking Development in Reinforced Concrete Beams with Organized Cracks // Polytransport Systems. Novosibirsk: Siberian State University of Railway Transport, 2020. Pp. 230-235.
17. Mitasov V.M. Formation and development of stochastic cracks in brittle and quasi-brittle materials (on the example of reinforced concrete structures) // Natural and intellectual resources of Siberia (SIBRESURS-24-2018). Tomsk: Publishing house of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2018. Pp. 105-109.

18. Petrov V.V., Selyaev P.V. Incremental Model of Interaction of Nonlinearly Deformable Materials with Aggressive Medium // Durability of Building Materials, Products and Constructions. Saransk: N. P. Ogarev Mordovian State University, 2014. Pp. 145-151.

19. Petrov V.V. Methods of selecting the main part of the solution in the calculation of nonlinearly deformed beams // Bulletin of the Saratov State Technical University, 2011. № 3(61). Pp. 160-169.

20. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovsky K.P. Strength and Deformability of Reinforced Concrete Structures under Beyond Design Influences. Moscow: ABC, 2004. 216 p.

**Информация об авторе:**

**Колчунов Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры уникальных зданий и сооружений.

E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

**Information about author:**

**Kolchunov Vladimir Iv.**

Southwestern state university, Kursk, Russia,

corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Unique Buildings and Structures.

E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)