



ГП «УкрНТЦ
«Энергосталь»

Министерство
Экономического развития
и торговли Украины

СБОРНИК ТРУДОВ

V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения, защиты окружающей природной среды

Инновационные пути
модернизации
базовых отраслей
промышленности

Охрана
окружающей
природной среды

Энерго- и
ресурсосбережение



23-24 марта 2016 г.
Украина, г. Харьков

**Молодежь – стратегический ресурс
науки и производства!**

МИНИСТЕРСТВО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И ТОРГОВЛИ УКРАИНЫ

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«УКРАИНСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ «ЭНЕРГОСТАЛЬ»**

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ
БАЗОВЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ, ОХРАНА
ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

**V Международная научно-практическая конференция
молодых ученых и специалистов в области проектирования предприятий
горно-металлургического комплекса, энерго- и ресурсосбережения
и защиты окружающей природной среды
(23–24 марта 2016 г., г. Харьков)**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**ХАРЬКОВ
2016**

УДК 504 (063)

И 66

Печатается по решению Научно-технического Совета
ГП «УкрНТЦ «Энергосталь». Протокол № 2 от 25 марта 2016 г.

Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды: сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, 23–24 марта 2016 г., г. Харьков. – Х.: ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 209 с.

В сборнике представлены материалы, отражающие инновационные подходы к решению актуальных проблем развития базовых отраслей промышленности, повышения энергоэффективности, внедрения ресурсосберегающих мероприятий, улучшения экологических показателей функционирования промышленных предприятий, современные технологии и оборудование для утилизации промышленных, бытовых и особо опасных отходов, решение проблем защиты воздушного и водного бассейнов.

Статьи печатаются в авторской редакции.

Перепечатка материалов допускается только
с письменного разрешения редакции.
При цитировании ссылка обязательна.

© ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2016

А.А. ШКУРУПИЙ, канд. техн. наук, П.Б. МИТРОФАНОВ, канд. техн. наук,
Е.А. АНТОНЕЦ, А.С. КОРОЛЬ, Е.В. УЗНАДЗЕВ, Ю.В. КУРИШКО

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ КРИТЕРИЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

Представлен расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов (ЖБЭ) из высокопрочных бетонов, а также определена граничная деформация бетона сжатой зоны (ε_{cu}) на основе деформационных моделей (ДМ) ЖБЭ Еврокода-2 и ДМ с экстремальным критерием прочности (ЭКП). Показаны преимущества ДМ с ЭКП, что позволяет выполнять расчеты прочности изгибаемых и сжатых ЖБЭ, аналитически определять величины ε_{cu} при различных процентах армирования и другие характеристики нормального сечения ЖБЭ в предельном состоянии.

Ключевые слова: железобетонный элемент, предельная деформация бетона, деформационная модель, критерий прочности.

В бетоне сжатой зоны ЖБЭ в допредельном и предельном состояниях происходит специфическое перераспределение напряжений, которое сопровождается их снижением в наиболее деформированном слое, вблизи сжатой грани ЖБЭ, хотя деформации продолжают нарастать. Об этом свидетельствуют эксперименты [1] и др. Отмеченное снижение напряжений (разупрочнение) происходит в структурно-неоднородных (псевдопластичных) материалах, таких как бетоны, горные породы и т.п. Для них характерно неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС). Разупрочнение обусловлено проявлением нисходящей ветви полной диаграммы сжимания (ПДС) бетона, которое отображает процесс снижения несущей способности материала, нарастания степени его разрушения. При расчете прочности ЖБЭ для учета снижения напряжений в сжатом бетоне необходима ПДС с нисходящей ветвью максимальной протяженности, поскольку заранее не известно какой длины ее участок будет реализован в конкретной задаче. ДМ стрежневых ЖБЭ, разновидности которых давно используются в нормах стран Европы, включая Евроноормы [2], получила значительное развитие в странах бывшего СССР [3–6] и продолжает совершенствоваться. По сравнению с нормами [7], ДМ является определенным шагом вперед, поскольку она, следуя общему подходу механики деформируемого твердого тела (МДТТ), использует полный набор уравнений МДТТ: физические (для бетона и арматуры) и геометрические (закон плоских сечений и уравнения равновесия). В результате ДМ позволяет точнее находить границу переармирования, прочность переармированных ЖБЭ, учитывать характер диаграммы растяжения арматуры и другие факторы. При этом расчет прочности нормальных сечений ЖБЭ на основе ДМ связан, в частности, с использованием критерия прочности (разрушения) по бетону

$$\varepsilon_{cm} \leq \varepsilon_{cu}, \quad (1)$$

где ε_{cm} – деформация сжатого волокна бетона ЖБЭ в опасном нормальном сечении (рис.1), ε_{cu} – предельная деформация бетона сжатой зоны ЖБЭ, понятие которой, методы определения и значения различные в известных ДМ. От величины ε_{cu} существенно зависит прочность ЖБЭ, поэтому анализ понятий и методов определения ε_{cu} представляет научно-практический интерес.

Сейчас проходит процесс гармонизации нормативных документов для проектирования бетонных и железобетонных конструкций и их элементов с Евроноормами [2], в которых учитываются классы прочности бетона в диапазоне

от С 12/15 до С 90/105. В действующих в Украине нормах [7] учитываются лишь классы прочности бетонов в диапазоне от С 3,5 до С 60. В сопоставлении с нормами [2] это отвечает классам прочности бетонов до С 50/60. В действующих нормах [7] отсутствуют рекомендации относительно расчета прочности ЖБЭ из высокопрочных бетонов, а также определение их физико-механических характеристик. Поэтому разработка таких рекомендаций представляет научно-практический интерес.

Среди существующих ДМ необходимо отметить ДМ с ЭКП [5, 6], которая имеет существенные преимущества перед упомянутыми выше. Она дает возможность рассчитывать прочность ЖБЭ в нормальном сечении и получать физико-механические характеристики при применении широкого спектра классов прочности бетона (от С 10 до С 120) [8]. Существующие ДМ, кроме ДМ с ЭКП, нуждаются в экспериментальном определении предельной деформации сжатого бетона ε_{cu} . Поэтому совершенствование методики расчета прочности изгибаемых и сжатых ЖБЭ из высокопрочных бетонов на основе ДМ с ЭКП является актуальной задачей.

Целью работы является теоретическое исследование прочности изгибаемых ЖБЭ в нормальном сечении из высокопрочных бетонов, а также определение ε_{cu} на основе ДМ с ЭКП с учетом влияния процента армирования при одиночном и двойном армировании, класса прочности бетона, и сравнение полученных результатов с аналогичными значениями ε_{cu} , которые приняты за основу в [2].

Условие (1) не соблюдается в слабоармированных элементах. Выполнение условия (1) можно обеспечить путем назначения количества растянутой арматуры не ниже соответствующего минимума $\mu_{min} \geq 0,25 - 0,3\%$, при котором уже происходит разрушение с раздавливанием бетона сжатой зоны ЖБЭ. Такой подход к выполнению условия (1) использовался в нормах (например, п. 1.19 [7]), и его есть смысл сохранить при проектировании железобетонных конструкций и их элементов.

В зависимости от того, как определяются величины ε_{cu} в условии (1), могут быть ДМ довольно разной точности. Так, в ДМ Евронорм [2] величины ε_{cu} определялись путем измерения деформаций ε_{cu} сжатого бетона в стадии разрушения опытных железобетонных балок и колонн. На основе указанных измерений в Евронормах [2] принято для бетонов низкой и средней прочности (С 12/15...С 50/60 МПа) $\varepsilon_{cu} = const = 3,5\%$, а для высокопрочных бетонов (С 55/67...С 90/105 МПа) $\varepsilon_{cu} = 3,2...2,8\%$.

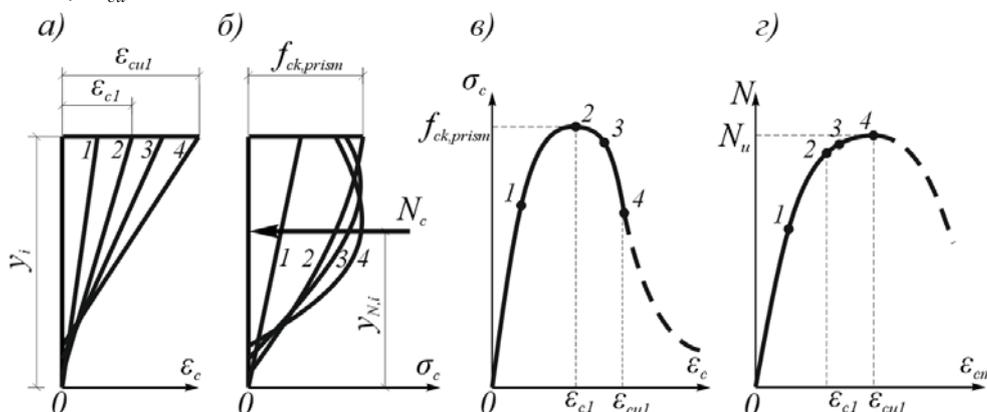


Рисунок 1 – Допредельные (1, 2, 3) и предельные (4) состояния развития деформаций (а) и напряжений (б) в сжатой зоне бетона ЖБЭ. Соответствие состояний 1, 2, 3, 4 на диаграмме сжатия бетона (в) и кривой «усилие в сечении – деформация сжатой грани бетона». Пунктирные линии I, II, III характеризуют соответственно псевдопластические, пластические и пластические тела, которые упрочняются.

Результатом перераспределения напряжений σ_b в сжатой зоне бетона ЖБЭ в предельной стадии является экстремальный критерий прочности нормального сечения ЖБЭ [6]

$$F(\varepsilon_{cu}) = \max F(\varepsilon_{cm}), \quad (2)$$

что выражает достижение строгого максимума усилием F (M або N) сечения как функцией деформации ε_{cm} сжатой фибры бетона ЖБЭ (рис. 1, а). Строгий максимум зависимости «усилие сечения – деформация», очевидно, может быть только при проявлении в сжатой зоне ЖБЭ строгого максимума и наличия нисходящей ветви физического закона сжатого бетона $\sigma_b - \varepsilon_b$ (рис. 1, в). При замене в ДМ критерия (1) критерием (2) образовывается новая, более совершенная ДМ с ЭКП, для которой не нужно экспериментально определять ε_{cu} , так как последняя исчисляется из совокупности уравнений МДТТ и критерия (2) как одна из неизвестных величин задачи прочности нормального сечения.

Для определения связи между нагрузкой F , деформациями и напряжениями бетона сжатой зоны ε_c, σ_c , а также растянутой ε_s, σ_s и сжатой $\varepsilon'_s, \sigma'_s$ арматуры в нормальном сечении ЖБЭ используем расчетные схемы (рис. 2) и зависимости:

1. Физические:

а) для бетона используется формула 3.14 [2]

$$\sigma_c = R_c (K\eta - \eta^2) / [1 + (K - 2)\eta], \quad (3)$$

где уровень деформаций η и параметр деформативно-прочностных (механических) свойств бетона K определяются по формулам

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_R, \quad K = 1,1 \cdot E_c \cdot \varepsilon_R / R_c; \quad (4)$$

E_c – среднее значение начального модуля упругости бетона, которое предлагается определять по формуле (5), которую получил Шкурупий А.А. на основании данных таблицы 18 [7] и экспериментальных данных. Достоверность аппроксимации составляет 0,997.

$$E_c = E_{cm} = 12,7 \cdot \ln(C) - 11. \quad (5)$$

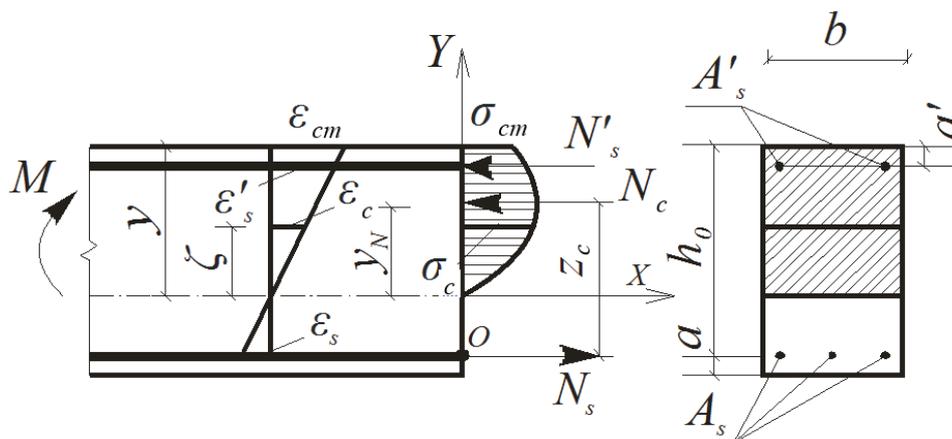


Рисунок 2 – Расчетная схема ЖБЭ

Эта зависимость действительна для классов прочности бетона (C) на интервале от $C10$ до $C120$, т.е. E_c можно определять и для высокопрочных бетонов;

R_c , ε_R – напряжение и деформация в максимуме кривой $\sigma_c - \varepsilon_c$ (рис. 1, в). Величину R_c предлагается определять по формуле. $R_c = 0,8 \cdot C^{0,973}$, которую получил Шкурупий А.А. на основании данных таблицы 18 [7] и экспериментальных данных. Достоверность аппроксимации составляет 0,997. Деформация ε_R определялась по формуле (6) (таблица 3.1 [2]).

$$\varepsilon_R = 70 \cdot 10^{-5} R_c^{0,31}. \quad (6)$$

Она простая и лучше других отображает очерчивание кривых $\sigma_c - \varepsilon_c$ для бетонов разной прочности на интервале $C = 12/15 \dots 90/105$ МПа.

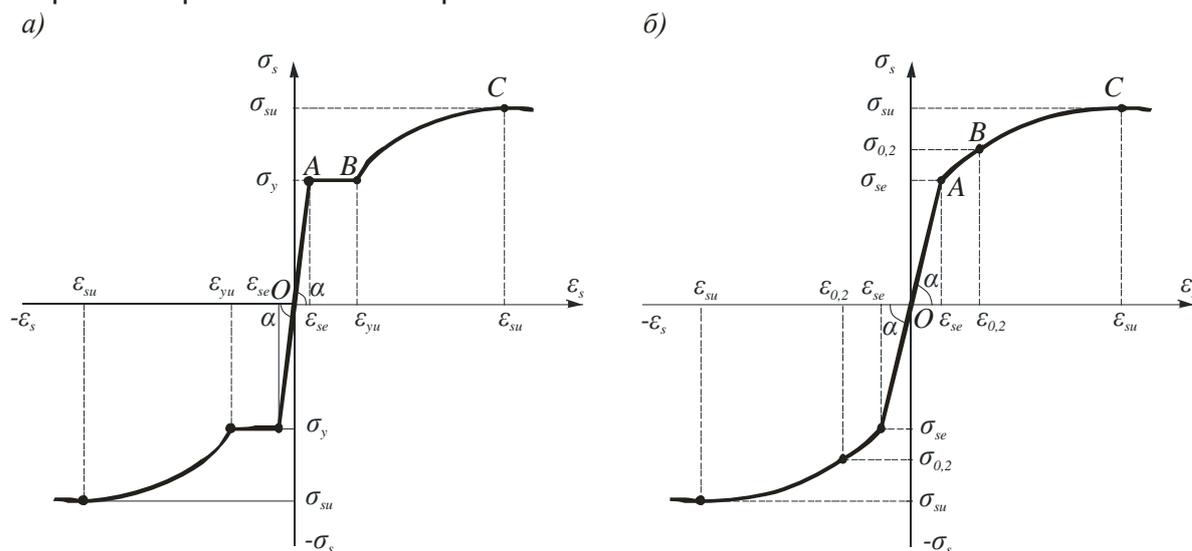


Рисунок 3 – Диаграммы растяжения (сжатия) арматурных сталей с физическим (а) и условным (б) пределом текучести

б) для арматуры аналитические выражения диаграммы растяжения (сжатия) разделены на два типа: с физическим пределом текучести σ_y (рис. 3, а) и с условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ (рис. 3, б). При этом для арматуры с физическим пределом текучести иногда (при малом проценте армирования) необходимо рассмотреть область упрочнения BC , что на интервале деформаций $\varepsilon_{yu} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$ (рис. 3, а) аппроксимируем параболой (5) [9].

Для арматуры без площадки текучести применяется линейно-двупараболическая аппроксимация диаграммы растяжения (6) [9].

2. Геометрические зависимости определялись на основе гипотезы плоских сечений, что позволяет выразить через деформацию ε_{cm} деформации сжатой зоны бетона ε_c на уровне волокон с координатой ζ , а также деформации растянутой и сжатой арматуры (рис. 2):

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cm} \cdot \zeta / y; \quad (7)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cm} \cdot (h_0 / y - 1); \quad (8)$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cm} \cdot (1 - a' / y), \quad (9)$$

где y – высота сжатой зоны бетона, a' – расстояние от равнодействующей в арматуре сжатой зоны бетона до ближайшей грани сечения, h_0 – рабочая высота сечения.

Обозначив $\alpha = \varepsilon_{cm} / \varepsilon_R$, получим, что $\eta = \alpha \zeta / y$, где α – относительная деформация сжатой грани бетона ЖБЭ в нормальном сечении.

3. Уравнения равновесия (рис. 2):

$$\sum X = 0; \quad \sigma_s \cdot A_s - N_c - \sigma'_s \cdot A'_s = 0; \quad (10)$$

$$\sum M_O = 0; \quad M - N_c \cdot y_N - \sigma'_s \cdot A'_s \cdot (y - a') - \sigma_s \cdot A_s \cdot (h_0 - y) = 0, \quad (11)$$

где N_c – равнодействующая бетона сжатой зоны

$$N_c = \iint_{A_c} \sigma_c(\alpha, \zeta) dx d\zeta = \int_0^y \sigma_c(\alpha, \zeta) \left(\int_{b_1(\zeta)}^{b_2(\zeta)} dx \right) d\zeta = N_c(\alpha, y); \quad (12)$$

y_N – расстояние от нулевой линии деформаций до точки приложения усилия N_c , которое представим в виде

$$y_N = \left(\iint_{A_c} \sigma_c(\alpha, \zeta) \zeta dx d\zeta \right) / N_c = \left(\int_0^y \sigma_c(\alpha, \zeta) \zeta \left(\int_{b_1(\zeta)}^{b_2(\zeta)} dx \right) d\zeta \right) / N_c = y_N(\alpha, y). \quad (13)$$

Используя зависимости (3)–(11), с учетом (12)–(13) получим систему уравнений с неизвестными N, α, y .

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_s(\alpha, y) \cdot A_s - N_c(\alpha, y) - \sigma'_s(\alpha, y) \cdot A'_s &= 0; \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} M - N_c(\alpha, y) \cdot y_N(\alpha, y) - \sigma'_s(\alpha, y) \cdot A'_s \cdot (y - a') - \sigma_s(\alpha, y) \cdot A_s \cdot (h_0 - y) &= 0. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Для определения неизвестных N, α, y используем (14), (15) и дополнительное условие в виде ЭКП нормального сечения (2). В результате имеем оптимизационную задачу нелинейного математического программирования на условный экстремум с целевой функцией (2) при ограничениях-равенствах (14), (15).

Для вычисления определенных интегралов (12), (13) применялся численный метод Симпсона. Для решения оптимизационной задачи нелинейного математического программирования использовался итерационный метод Ньютона, а для проверки вычислений – метод сопряженных градиентов. Приведенная выше методика на основе сформулированных расчетных положений и зависимостей, реализована с применением указанных численных методов в программе для ПЕОМ «МОК1-05».

Данная методика позволяет выполнить расчеты при любых значениях сопротивления бетона и напряжениях в арматуре.

Как видно из рис. 4, класс бетона существенно влияет на прочность ЖБЭ, а процент армирования μ_s – только при его увеличении до 15 %. Дальнейшее увеличение процента армирования в нормальном сечении с бетонами малой и средней прочности практически не влияет на прочность ЖБЭ, а для высокопрочных бетонов увеличение прочности ЖБЭ при $\mu_s > 15\%$ составляет не более 7 %.

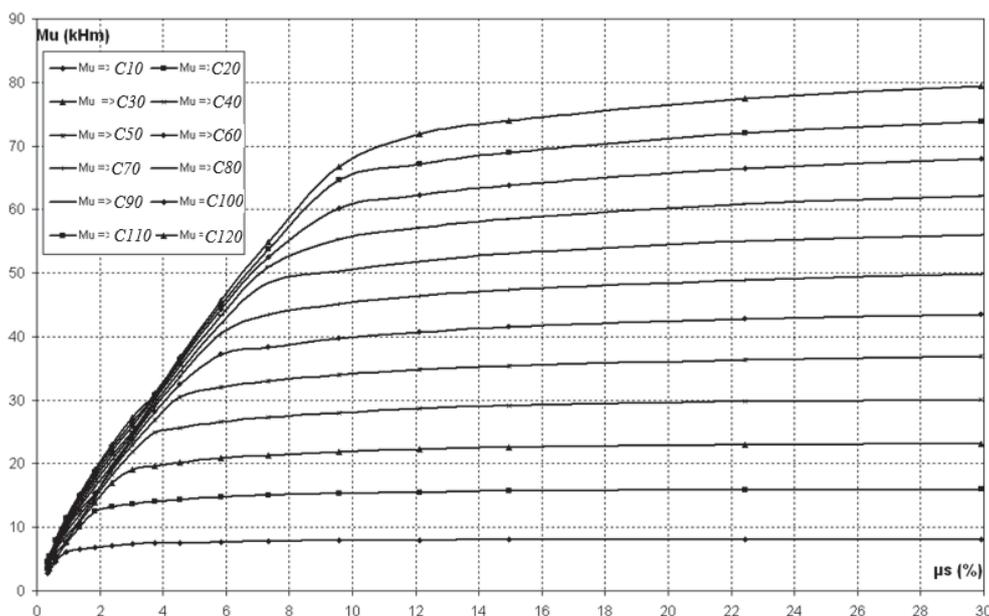


Рисунок 4 – Изменение прочности ЖБЭ от μ_s при различных классах бетона

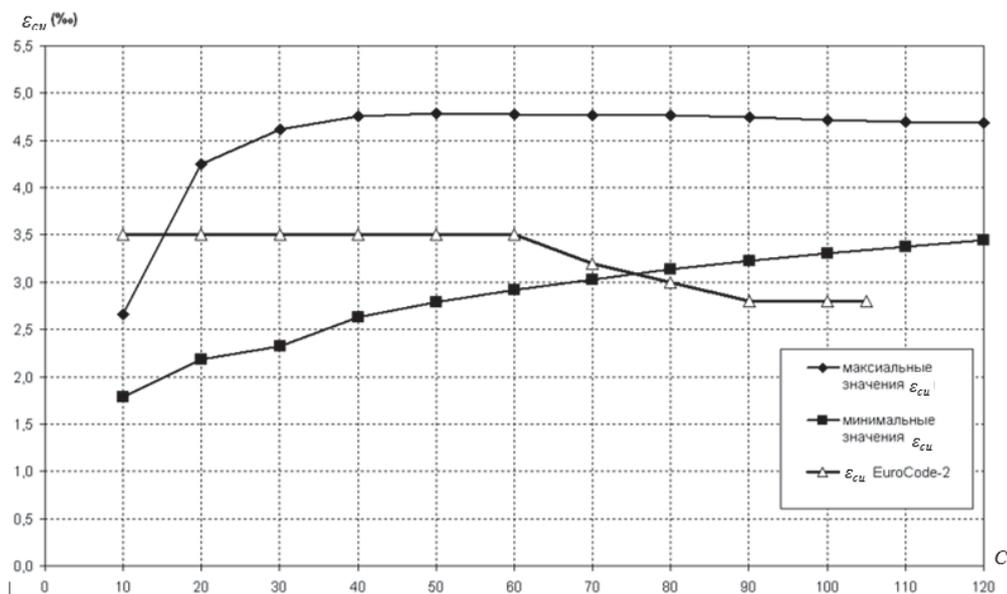


Рисунок 5 – Изменение ϵ_{cu} от класса прочности бетона и процента армирования

Расчет прочности и анализ предельных характеристик сжатой зоны бетона нормального сечения изгибаемых ЖБЭ выполнен по приведенному выше алгоритму на основе ДМ с ЭКП. Армирование – одиночное без предварительного напряжения. Класс арматуры постоянный – А400С. Процент армирования изменялся от 0,15 до 30 %. Класс прочности бетона – от С10 до С120. Размер поперечного сечения ЖБЭ принимался постоянным ($b \times h = 0,12 \times 0,18$ м).

На рис. 5 показаны соответственно кривые зависимостей деформации ϵ_{cu} от класса прочности бетона и процента армирования, который изменялся от 0,15 до 30 %. Эти значения получены по методике на основе ДМ с ЭКП для разных напряженно-деформированных состояний ЖБЭ и приведены данные таблицы 3.1 [2]. Кривая $C - \epsilon_{cu}$ в соответствии с [2] располагается в «коридоре», ограниченном кривыми ДМ с ЭКП. Нижняя кривая соответствует переармированным ЖБЭ, а верхняя кривая – ЖБЭ с малым процентом армирования ($\mu_s < 0,2$ %), т.е., когда арматура работает в области упрочнения ВС (рис. 3).

СОДЕРЖАНИЕ

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ, ВНЕДРЕНИЕ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ, УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Брыгида А.А.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА _____ 3

**Пшемьский Г.Ф., Качанова В.А., Литинский Е.Б.,
Колесникова О.А., Островерх В.М.**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕВОДА
ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ЦЕХА ЭЛЕКТРОДНОЙ МАССЫ
ПАО «НИКОПОЛЬСКИЙ ЗАВОД ФЕРРОСПЛАВОВ» НА ОТОПЛЕНИЕ
ФЕРРОСПЛАВНЫМ ГАЗОМ _____ 9

Тарасенко А.Н.

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ
ТРУБЧАТЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ _____ 13

Глебова Т.П., Цыбова Н.В.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА
В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РИСКОВ _____ 18

Крушневич С.П., Пятничко А.И., Жук Г.В., Солтаниберешне М.А.

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ШЛАМОВОЙ ПЕЧИ _____ 24

Беспясова А.С., Пыхтин Я.М., Пасько В.С.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ РЕЛЬСОВ УЗКОЙ КОЛЕИ _____ 27

Климов А.Н., Селезнёв М.А.

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ В ГЕНЕРАЛЬНОМ ПЛАНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА
В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ № 9 ПАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ» _____ 33

Артеменко А.В.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА, НАПРАВЛЕННАЯ
НА СНИЖЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, СОЗДАВАЕМОЙ
ЭТИМИ ОБЪЕКТАМИ, НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ _____ 38

**Шкурупий А.А., Митрофанов П.Б., Антонец Е.А., Король А.С.,
Узнадзе Е.В., Куришко Ю.В.**

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ
КРИТЕРИЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ _____ 43

Попович А.Н., Климаш А.А., Соловьев Г.И., Суворин А.В.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ
ГОРЕЛОК ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО
СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА _____ 50