

УДК 624.072

Корепанов Данил Александрович

Студент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет

Korepanov Danil Alexandrovich

Student

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ

Аннотация.

В данной статье рассматривается расчёт изгибаемых железобетонных конструкций, армированных сталью с площадкой текучести, при действии динамических нагрузок. Показано, что при использовании традиционной билинейной упругопластической диаграммы недооценивается резерв несущей способности, поскольку после основной пластической стадии материал сохраняет значительную остаточную прочность. Предлагается метод расчёта, в котором сечение проходит четыре стадии работы (упругая, пластическая, снижения несущей способности, остаточной прочности), а конструкция на каждой стадии моделируется как система с одной степенью свободы или жёсткий механизм с условным шарниром пластичности. Рассмотрены дифференциальные уравнения движения для каждой стадии с учётом предельных углов раскрытия трещины и начальных условий на границах стадий. На примере шарнирно-опёртой балки, показана зависимость амплитуд динамической нагрузки, максимальных прогибов и условных углов раскрытия трещины от продолжительности действия нагрузки и предельного состояния. Результаты исследований позволяют повысить экономичность конструкций и уточнить допустимые значения динамических воздействий. Анализ данных показывает, что переход конструкции к более высоким предельным состояниям сопровождается значительным ростом допустимой динамической нагрузки при относительно небольшом увеличении прогибов и углов раскрытия трещин, что

подтверждает эффективность детального учёта всех стадий деформирования сечения.

Abstract.

The article considers the calculation of bendable reinforced concrete structures reinforced with steels with a yield point under the action of dynamic loads. It is shown that when using a traditional bilinear elastoplastic diagram, the reserve of bearing capacity is underestimated, since after the main plastic stage the material retains significant residual strength. A calculation method is proposed in which the cross section goes through four stages of operation (elastic, plastic, reduced bearing capacity, residual strength), and the structure at each stage is modeled as a system with one degree of freedom or a rigid mechanism with a conditional hinge of plasticity. Differential equations of motion for each stage are considered, taking into account the limiting angles of crack opening and the initial conditions at the boundaries of the stages. Using the example of a pivotally supported beam, the dependence of dynamic load amplitudes, maximum deflections and conditional crack opening angles on the duration of the load and the limiting state is shown. The research results make it possible to increase the cost-effectiveness of structures and clarify the permissible values of dynamic impacts. Data analysis shows that the transition of the structure to higher limiting states is accompanied by a significant increase in the permissible dynamic load with a relatively small increase in deflections and crack opening angles, which confirms the effectiveness of detailed consideration of all stages of section deformation.

Ключевые слова.

Железобетонные конструкции, динамические нагрузки, резерв прочности, диаграмма деформирования, шарнир пластичности, предельные состояния, амплитуда, остаточная прочность.

Key words.

Reinforced concrete structures, dynamic loads, strength reserve, deformation diagram, plasticity joint, limiting states, amplitude, residual strength.

Введение.

Современный расчёт изгибаемых железобетонных элементов при динамических воздействиях в основном базируется на билинейной упругопластической модели деформирования стали, что не позволяет полностью учесть резерв несущей способности сечения. При одновременном использовании упругой и пластической стадий деформирования традиционные методы не отражают этап снижения несущей способности и остаточной прочности конструкции после исчерпания площадки текучести. В связи с этим актуально рассмотрение методики, позволяющей рассматривать полную кривую деформирования сечения, включая стадию разупрочнения и остаточное сопротивление, с последующим расчётом предельных состояний при динамическом нагружении.

Цель исследования.

Цель данной работы – выполнить анализ метода расчёта изгибаемых железобетонных конструкций при кратковременных и продолжительных динамических нагрузках с учётом полного закона деформирования сечений и резерва несущей способности на всех стадиях работы, а также определить предельные значения динамических нагрузок, соответствующие заданным деформационным ограничениям и эксплуатационным требованиям.

Материал и методы исследования.

В исследовании принята шарнирно-опёртая железобетонная балка, изготовленная из тяжелого бетона и армированная стальной проволочной арматурой. Для расчёта использована полная полигональная диаграмма деформирования сечений, включающая упругую, пластическую, стадию снижения несущей способности и остаточной прочности, с критерием предельного состояния в виде условного угла раскрытия трещины в шарнире пластичности.

В настоящее время изгибаемые железобетонные конструкции, армированные сталями с площадкой текучести, рассчитывают на действие динамических нагрузок с использованием билинейной идеальной упругопластической диаграммы деформирования [1]. Однако после окончания

пластической стадии работы они обладают еще достаточным резервом прочности [2]. Для учета резерва несущей способности предлагается при расчете конструкций использовать полную полигональную диаграмму деформирования сечений и соответствующие ей предельные со стояния конструкции [3].

В общем случае при действии на балку динамической нагрузки $P(x,t)$ наиболее напряженное сечение конструкции проходит четыре характерных стадии работы (рис. 1). На каждой стадии работы сечения конструкцию считают системой с одной степенью свободы. При расчете балки в упругой стадии используют известные методы для определения динамических прогибов и внутренних усилий.

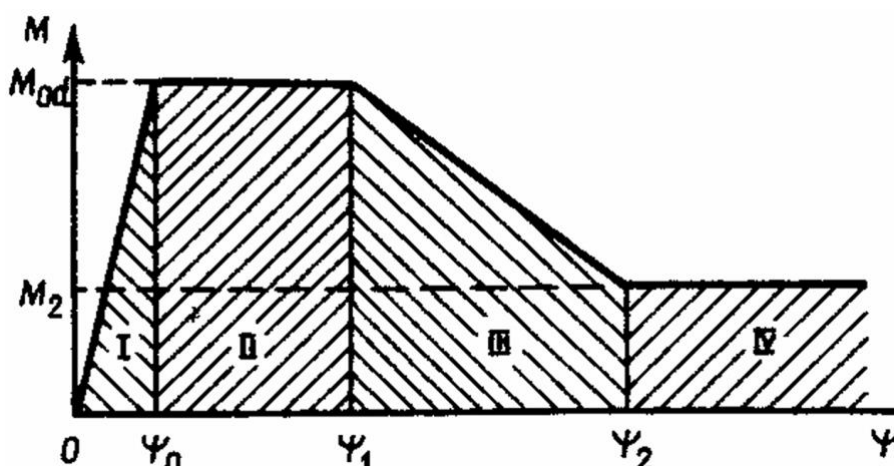


Рис. 1. Полная расчетная диаграмма деформирования сечения для изгибаемых железобетонных элементов Стадии: I — упругая; II — пластическая; III — снижения несущей способности; IV — остаточной прочности.

При работе наиболее напряженного сечения за пределом упругости конструкцию рассматривают как механизм, состоящий из двух жестких звеньев, соединенных шарниром пластичности (рис. 2).

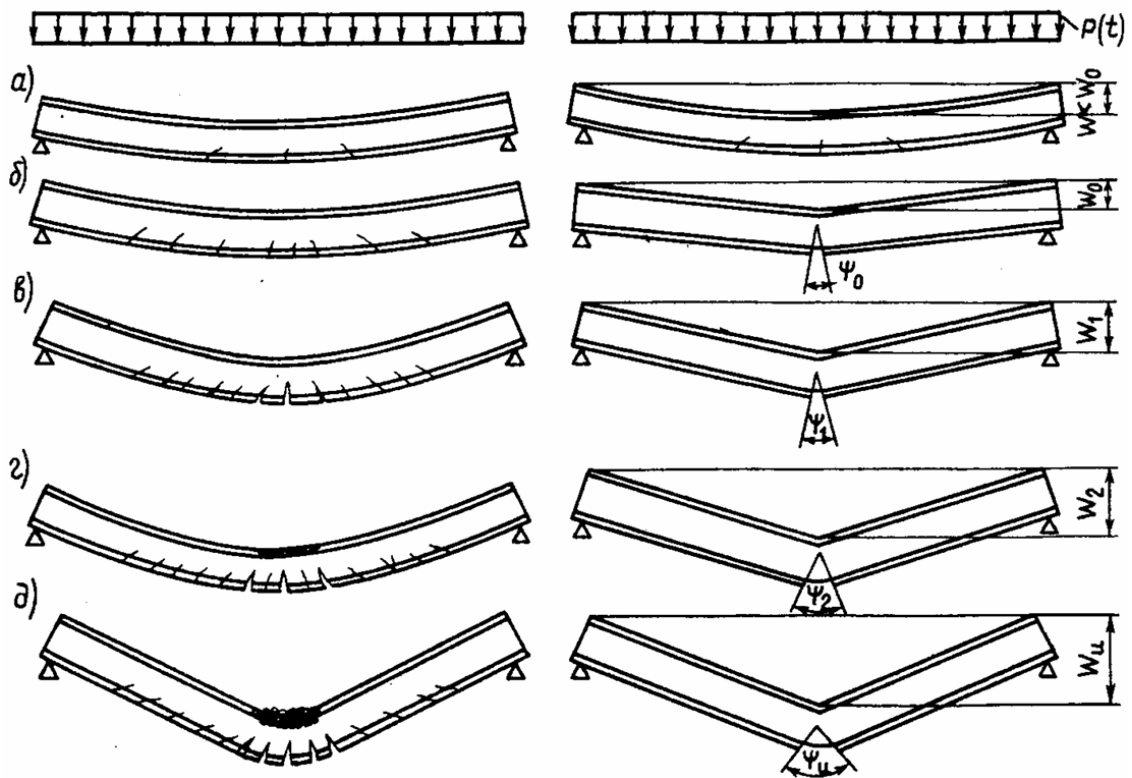


Рис. 2. Действительные и расчетные схемы деформирования изгибаемого железобетонного элемента а, б — при упругой работе; б, в, г, д — при работе за пределом упругости.

Изгибающий момент в шарнире пластичности $M(\varphi)$, воспринимаемый сечением, меняется в соответствии с полной полигональной диаграммой в зависимости от условного угла раскрытия трещины φ (см. рис. 1).

Критерием исчерпания несущей способности при заданных ограничениях является предельный угол раскрытия трещины в условном шарнире пластичности φ_{ult} , который назначают в зависимости от относительной высоты сжатой зоны сечения ξ , соответствующей концу упругой стадии работы сечения, и требований, вытекающих из условий эксплуатации [3]. Рассмотрим каждую стадию работы сечения при действии на шарнирно опертую балку равномерно распределенной по пролету l динамической нагрузки $P(t)$. Если к балке будет приложена такая нагрузка, при которой конструкция остановится, не достигнув наибольшего упругого прогиба W_0 (см. рис. 2), соответствующего углу φ_0 , то рабочая арматура в растянутой зоне не достигнет предела текучести и наиболее напряженное сечение будет деформироваться в пределах стадии I.

Дифференциальное уравнение, описывающее движение конструкции в упругой стадии [1]:

$$BW_d^{IV} + m\ddot{W}_d = P(t) \quad (1)$$

где B - жесткость балки;

m - погонная масса;

$W_d(x, t)$ - динамический прогиб.

При достижении конструкцией прогиба W_0 (см. рис. 2) $M_{\max} = M_{0,d}$ и сечение переходит в пластическую стадию работы. Из этого условия определяют динамическую нагрузку, при которой достигается предельное состояние I. Если в момент перехода из упругой стадии работы сечения в пластическую (см. рис. 2), при $t = t_0$ конструкция имеет положительную скорость $\dot{\varphi}_0$, то при дальнейшем деформировании наи более напряженное сечение будет работать в пределах стадии II. Дифференциальное уравнение движения конструкции при пластической стадии работы сечения:

$$\frac{ml}{3}\ddot{\varphi}(t) = P(t) - P_0 \quad (2)$$

где $\ddot{\varphi}(t)$ - ускорение угла поворота половины балки при работе конструкции за пределом упругости;

P_0 - погонная нагрузка, вызывающая максимальный упругий прогиб и воспринимаемая конструкцией на стадии пластической работы сечения балки,

т.е. при $P_0 = \frac{8(M_{0,d} - M_q)}{l^2}$;

где M_q - изгибающий момент в наиболее напряженном сечении, возникающий от действия постоянной нагрузки интенсивностью q .

Для решения уравнения (2) используют начальные условия, соответствующие концу упругой стадии работы: при $t = t_0$ следует, что $\varphi(t_0) = \varphi_0$ и $\dot{\varphi}(t_0) = \dot{\varphi}_0$

Если максимальный прогиб балки W_{\max} достигается на стадии пластической работы сечения, то конструкция не достигнет предельного

состояния II, если $\varphi(t_{\max}) < \varphi_{ult,II}$ ($\varphi_{ult,II}$ - предельный угол раскрытия трещины в условном шарнире при пластической работе сечения [3]).

Предельную динамическую нагрузку при расчете конструкции по предельному состоянию II определяют из условия:

$$\varphi(t_{\max}) = \varphi_{ult,II} \quad (3)$$

Если в момент достижения условного угла φ_1 (см. рис. 2) конструкция будет иметь положительную скорость $\dot{\varphi}_1$, то при дальнейшем движении (т.е. при $t > t_1$) наиболее напряженное сечение начнет работать на стадии снижения несущей способности. Для этого этапа работы конструкции также составляют дифференциальное уравнение движения:

$$\frac{ml}{3} \ddot{\varphi}(t) = P(t) - P(\varphi) \quad (4)$$

где $P(\varphi)$ - погонная нагрузка, которую воспринимает конструкция на стадии снижения несущей способности сечения, зависящая от угла раскрытия трещины в условном шарнире пластичности, ее находят из выражения для определения P_0 при замене $M_{0,d}$ на $M(\varphi)$.

При решении дифференциального уравнения (4) используют начальные условия, соответствующие концу пластической работы сечения: при $t = t_1$, следует что $\varphi(t_1) = \varphi_1$ и $\dot{\varphi}(t_1) = \dot{\varphi}_1$. При достижении максимального прогиба на данном этапе работы сечения должно соблюдаться условие $\varphi(t_{\max}) \leq \varphi_{ult,III}$ (где $\varphi_{ult,III}$ - предельный угол раскрытия трещины в условном шарнире пластичности при работе сечения на стадии снижения несущей способности [3]). Значение предельной динамической нагрузки при расчете по предельному состоянию III определяют из равенства $\varphi(t_{\max}) = \varphi_{ult,III}$.

При положительной скорости в момент достижения угла φ_2 (см. рис. 2) возможен переход работы сечения в стадию остаточной прочности. Для этого этапа работы конструкции справедливо дифференциальное уравнение движения:

$$\frac{ml}{3}\ddot{\varphi}(t) = P(t) - P_2 \quad (5)$$

где P_2 - погонная нагрузка, которую воспринимает конструкция при деформировании сечения на стадии остаточной прочности, ее определяют при замене $M_{0,d}$ на M_2 .

$$M_2 = 0,425M_{0,d}e^{-1,68\xi} \quad (6)$$

При решении уравнения (5) используют начальные условия, соответствующие концу снижения несущей способности сечения: при $t = t_2$, следует что $\varphi(t_2) = \varphi_2$ и $\dot{\varphi}(t_2) = \dot{\varphi}_2$. Предельное состояние IV нормируется предельным условным углом $\varphi_{ult,IV}$, который соответствует допустимым из условий эксплуатации перемещениям W_{ult} (см. рис. 2). В связи с этим из условия $\varphi(t_{max}) = \varphi_{ult,IV}$ находят нагрузку, при которой достигается это предельное состояние.

В зависимости от геометрических размеров, армирования, вида и продолжительности действия динамических нагрузок, а также ограничений, вытекающих из условий эксплуатации, возможно возникновение предельного состояния на всех стадиях работы сечения.

По разработанной программе рассчитана шарнирно-опертая балка пролетом $l = 200$ см, сечением $b \times h = 30 \times 15$ см, изготовленная из бетона класса В20, армированная в растянутой зоне $3\varnothing 12$ А500, а в сжатой зоне - конструктивной арматурой на действие кратковременной и продолжительной равномерно распределенной по пролету динамической нагрузки $P(t) = P\left(1 - \frac{t}{\tau}\right)$ при $0 \leq t \leq \tau$;
 $P(t) = 0$ при $t > \tau$.

Результаты исследования и их обсуждение.

Для данной конструкции найдены расчетные параметры диаграммы деформирования [3]: углы поворота $\varphi_0 = 0,0384$ рад; $\varphi_1 = 0,107$ рад; $\varphi_2 = 0,23$ рад; моменты $M_{0,d} = 18,95$ кН·м; $M_2 = 5,43$ кН·м. Амплитудные значения

динамической нагрузки P , максимальные прогибы W_{\max} и максимальные условные углы раскрытия трещины φ_{\max} для различных предельных состояний приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Расчетные параметры	Предельные состояния			
	I	II	III	IV
P , кН/м	390,5/18,4	887,6/30,8	1220/31,5	2297/31,6
W_{\max} , см	1,2/1,2	4,56/4,56	10,02/5,57	16,20/ ∞
φ_{\max} , рад	0,038/0,038	0,106/0,106	0,215/0,126	0,337/ π

Примечание. Перед чертой – для кратковременной динамической нагрузки, после черты – для продолжительной.

Выводы.

Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что амплитудные значения динамической нагрузки, при которых достигается одно из предельных состояний, существенно зависит от продолжительности ее действия. Предлагаемый метод расчета позволяет создать более экономичные конструкции благодаря полному использованию несущей способности сечений, также установить предельные значения допустимых динамических нагрузок, при которых достигается заданное предельное состояние.

Литература.

1. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений — М.: Стройиздат, 1980.— 190 с.
2. Попов Н.Н., Плотников А.И., Белобров И.К. Работа изгибаемых элементов при снижении несущей способности // Бетон и железобетон — 1986 — № 6 — С. 19-20.
3. Орленко А.Н., Емышев М.В. Диаграмма работы сечений изгибаемых элементов при расчете по предельным состояниям // Бетон и железобетон — 1990 — № 5 — С. 33-34.