

Ю. В. Немировский

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ МАССОВЫХ НАГРУЗОК

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема рационального (оптимального) проектирования высотных или административно-управленческих сооружений при активном использовании гибридных полиметаллических стандартизированных элементов, создаваемых на основе различных надежно разработанных технологий. Целью решения проблемы является подбор и перераспределение материалов, при которых с обеспечением требуемых комфортных и безопасных условий существования будут значительно улучшены экономические показатели создаваемого проекта. В качестве гарантированных требований комфортного существования использованы разработанные автором три различия критерия деформативности фазовых материалов в условиях заданных типов и полей внешних нагрузок. Первый критерий: «предельно допустимое упругое состояние» – когда ни один из фазовых материалов не будет деформироваться за пределом упругости. Второй критерий: «предельно допустимые деформации упрочнения» – когда фазовые материалы не переходят в состояние разупрочнения. Третий критерий: «предельно допустимые деформации разрушения» – когда какой-либо из фазовых материалов будет «локально» разрушаться. При расчетах учитывается, что ряд физических характеристик материалов в широких пределах технологических переработок довольно устойчиво сохраняют свои значения и используются как заранее известные данные из справочной литературы. К ним относятся пределы упругости и прочности, модули Юнга, удельные плотности и стоимости фазовых материалов. Такая малочувствительная технологическая устойчивость позволила для всех фазовых материалов при аппроксимации диаграммы деформирования различных металлических материалов использовать единообразную зависимость в виде кубической параболы, коэффициенты которой и упомянутые три предельно допустимые деформации выражаются через устойчивые характеристики – пределы упругости, прочности и модуль Юнга. На основе известных кинематических и статических гипотез описания неупругого деформирования стержневых систем для всех типов предельно-допустимых деформаций, получены единообразные системы уравнений, которые позволяют для заданных условий внешнего воздействия определить геометрические параметры и топологическую структуру распределения всех фазовых материалов по конструкции. В качестве внешних воздействий на конструкцию высотного сооружения рассматриваются традиционные ветровые нагрузки с заданным законом изменения вдоль вертикальной оси, заданные моменты и силы на верхнем вертикальном срезе и изменяемые при топологических перераспределениях массовые нагрузки. Степень усовершенствования проекта оценивается на основе анализа изменения введенных относительных характеристик несущей способности, податливости и стоимости проекта. Для сравнения используется эталонный проект из однородного материала.

Ключевые слова: гибридные полиметаллические конструкции, фазовые материалы, топология распределения, удельные плотности и стоимости фазовых материалов, модуль упругости, пределы упругости и прочности, предельно-допустимые деформации упругости (первая), начала разупрочнения (вторая) и начала локального разрушения (третья), несущая способность и податливость гибридных конструкций, относительные расходы материалов относительные стоимости гибридных проектов, эталонные конструкции

DOI: 10.37972/chgpu.2021.48.2.010

УДК: 539.374

Наблюдаемое в последние четверть века прогрессивное развитие отраслей строительной индустрии связано с необходимостью проектирования и создания высотных сооружений с повышенными требованиями комфортного пребывания в них и надежного функционирования в условиях эксплуатации. Возникающие при этом жесткие экономические и ресурсные требования чаще всего не могут быть выполнены с использованием существующих и многократно выверенных конструкционных материалов. В связи с этим в строительной науке активно и параллельно развиваются два направления: теория оптимального (или рационального) проектирования сооружений и теория разработки новых технологических принципов и приемов создания гибридных композитных конструкций с поиском необходимых наборов фазовых материалов и необходимого их топологического распределения в проектируемой конструкции.

Теория оптимального проектирования развивалась применительно к конструкциям из однородных материалов, подчиняющихся моделям деформирования упругих и вязкоупругих материалов, идеальных жестко-пластических, жестко-вязкопластических и ползучих материалов.

Были получены многие интересные аналитические решения и разработаны методы построения приближенных асимптотических и численных методов решения большого количества задач практического проектирования конструкций. При этом массовые нагрузки отбрасывались и задачи сводились к геометрическим задачам о распределении в пространстве материала проектируемой конструкции. Экономические ограничения для проектируемых конструкций также игнорировались. Впервые вопрос о влиянии массовых нагрузок на распределения материала оптимальной конструкции для идеальных жестко-пластических материалов был рассмотрен в работе [1], и на конкретных примерах показано, что неучет массовых нагрузок может приводить к ошибочным результатам. Эта работа была развита в [2–8], где наряду с физической неоднородностью материала, учитывалась также и конструктивная неоднородность

© Немировский Ю. В. 2021

Немировский Юрий Владимирович

e-mail: nemiruy@mail.ru, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия, профессор Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00038.

Поступила 30.07.2021

(гибридные и пластические конструкции). Влияние экономических ограничений слоистой конструкции было рассмотрено в работе [9,10], где было показано, что экономические ограничения в ряде случаев могут выступать непреодолимыми препятствиями при реализации планируемого строительного проекта.

Разработка различных технологических приемов создания разнообразных типов гибридных строительных композитных конструкций, используя разнообразные достижения последних десятилетий в области технической физики и химфизики, строительной механики и материаловедения, в настоящее время успешно и ускоренно развиваются. Многие отработанные технологии основанные на принципах склейки, наплавок, поверхностных упрочнений, разнообразных типах сварок, газодинамических и плазменных способов нанесения покрытий, уже в настоящее время позволяют надежно и без каких-либо серьезных ограничений по топологическим распределениям создавать на больших площадях гибридные пакеты из наборов практически любых существующих в строительной практике конструкционных металлов и сплавов [11–16].

Отметим важное обстоятельство. При анализе результатов испытаний по стандартным методикам образцов фазовых материалов в исходном состоянии и подвергаемым различным технологическим процедурам некоторые физико-технические характеристики фазовых материалов остаются практически неизменными и будут использованы нами как заранее известные в состоянии постановки, до включения в создаваемую гибридную конструкцию. К ним относятся: удельные плотности и удельные стоимости, модули упругости, пределы упругости и прочности, коэффициенты температурного расширения, предельная деформация разрушения для соответствующего фазового материала. Такая малочувствительная технологическая устойчивость позволяет при процессах неупругого деформирования для всех фазовых материалов использовать для аппроксимации процессов одноосного деформирования j -го фазового материала простейшую зависимость [17–22]

$$\bar{\sigma}_j = \bar{E}_j \varepsilon + \bar{B}_j \varepsilon^3, \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_j^{**}, \quad (1)$$

где

$$\bar{B}_j = -\frac{1}{3} \frac{\bar{E}_j}{(\varepsilon_j^*)^2} = -\frac{1}{3} \frac{(\bar{\sigma}_j^*)^2 \bar{E}_j}{(\bar{E}_{cj}^*)^2}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_j^* = \frac{3}{2} \frac{\bar{\sigma}_j}{\bar{E}_j}, \quad \varepsilon_j^0 = \frac{\bar{\sigma}_j^0}{\bar{E}_j}, \quad (3)$$

где \bar{E}_j , $\bar{\sigma}_j^0$, $\bar{\sigma}_j^*$, $\bar{\varepsilon}_j^0$, $\bar{\varepsilon}_j^*$, $\bar{\varepsilon}_j^{**}$ – модуль Юнга, предел прочности, предельная упругая деформация, предельная деформация упрочнения и предельная деформация разрушения j -го фазового материала.

В таблице 1 приведены в качестве примера доступные автору из справочной литературы необходимые для расчетов характеристики разных марок сталей, используемых в строительной практике.

При использовании законов деформирования фазовых материалов в ряде исследований [23–26] были разработаны замкнутые системы разрешающих модельных уравнений для описания деформирования состояния разнообразных гибридных стержневых конструкций в условиях сложных и продольно-поперечных изгибов и устойчивости, получен ряд принципиально новых и интересных практических результатов.

Марка стали ¹	σ_T , МПа ¹	σ_B , МПа ³	δ , % ²	E , ГПа	ρ кг/м ³	Стоимость
ВСтЗсп5	235	360	25	194	7850	1,00
ВСтЗсп5-1	235	365	25	194	7850	1,01
ВСтЗсп5-2	265	380	23	194	7850	1,03
09Г2С-6-1	325	470	21	200	7850	1,12
09Г2С-6-2	345	490	21	200	7850	1,14
14Г2АФ	390	540	20	196	7850	1,23
16Г2АФ	440	590	20	200	7850	1,27
12Г2СМФ	590	685	14	199	7850	1,56
12ХГН2МФБАЮ	735	735	2	199	7850	2,00

Таблица 1. Строительные стали различных уровней прочности

¹ σ_T – предел текучести по данным из *Металлические конструкции*. В 3т. Т.1. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общей редакцией засл. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). М.: Изд-во АСВ, 1998. 576 с.

² δ – относительное удлинение после разрыва по данным из ¹

³ σ_B – временное сопротивление (предел прочности при разрыве) по данным из ¹

Однако ожидать существенного развития исследований в этом направлении в ближайшее время трудно ожидать из-за отсутствия четко сформулированных требований по условиям и срокам эксплуатации, гарантия ресурсного и экономического обеспечения. Это особенно касается обсуждаемых проектов строительства высотных зданий и большепролетных сооружений в специальных замкнутых районах Юго-Запада, Алтая, Приполярья и Дальнего Востока. Здесь, в первую очередь, необходимо четко и однозначно сформулировать требования к условиям эксплуатации проектируемых сооружений, критерии оценки качества проектов, их связи с существующими отработанными технологическими приемами и установления допустимых границ комфортного существования при возникновении нештатных отклонений от утвержденных условий эксплуатации. Данная работа преследует цель в продвижении исследований в некоторых из сформулированных проблем.

1. Постановка задачи .

В ряде вышедших в последние годы детальных аналитических обзоров и монографий [27–35] обращено внимание на безальтернативную тенденцию бурного развития в крупных городах всех стран и континентов высотного строительства. Это связано с неблагоприятным влиянием развивающихся кризисных общественно-экономических факторов и быстрым ростом народонаселения в странах Юго - Восточной Азии, Южной Америки, Африки. К настоящему времени в странах построены и функционируют уникальные впечатляющие инженерную фантазию сооружения. Анализ накопленного опыта строительства показывает, что каждый из существующих проектов по многим причинам практически не может быть тиражирован и служить основой для массовой экономически и ресурсно обеспеченной застройки. В настоящий кризисный период в

первую очередь востребованы жилые и гостинично-туристические комплексы доступные для массового потребителя с обеспечением безопасного и комфортного проживания. С этой целью необходимо развивать новые методы инженерного проектирования и технологического производства широкопролетных многоэтажных сооружений с поточным изготовлением отдельных блоков на современном заводе с обеспечением необходимых материальных ресурсов и жесткого контроля качества создаваемых для сборки элементов. Производство отдельного жилого блока при этом превращается в производство десятка подконструкций. При этом надежность эксплуатации с обеспечением требуемой комфортности пребывания в помещении намного возрастет.

Одну из перспективных существующих направлений высотного строительства связано с надеждами использования разнообразного набора композитных конструкций, для обеспечения практически альтернативных требований по деформированию сооружений в горизонтальных и вертикальных направлениях. Это обстоятельство приводит к необходимости проектирования модульно консольных типов сооружений с существенно различными требованиями деформативности, надежности и комфортности при эксплуатации. Существующий опыт высотного строительства показывает [36], что с точки зрения развития ускоренных сроков индустриального строительства, наиболее рациональный путь обеспечивают созданием систем каркасов с консольными и подвесными жилыми блоками, в котором используют современные технологии монолитного производства перекрытий и ограждающих плит. При использовании таких технологических приемов наиболее ответственным и гибким инструментом к оптимизации становится несущий рамно-стержневой каркас, усовершенствование которого путем создания целевых металлокомпозитных структур, может существенно улучшить экономические и эксплуатационные параметры проектируемых сооружений.

2. Рациональное проектирование гибридных слоистых стержневых конструкций Технологические приемы создания слоистых полиметаллических конструкций [8–17, 30–36] указывают, что толщина каждого фазового материала остается неизменной вдоль оси гибридного стержня. Для стержней k -го блока обозначим ее Δ_{ki} ($i = 1, 2, 3$), где $i = 1, 2$ соответствуют горизонтальным стержням с длинами l_i , а $i = 3$ соответствуют вертикальному в блоке k стержню с высотой $h = l_{3k}$. Главная проблема заключается в поиске параметров Δ_{ki} , с выбором и перераспределением подходящих наборов конструкционных материалов в связи с прогнозируемыми внешними нагрузками и используемыми критериями комфортного и безопасного существования потребителей. В качестве последнего, в соответствии с разработками в [3–8, 17–23] предполагается использовать критерий предельно допустимых деформаций по требованию заказчика проекта или потребителей могут быть использованы первые (предельные упругие), вторые (деформации локальных пределов разупрочнения) или третьи (локальное разрушение) предельно допустимые деформации фазовых материалов.

Используя для полиметаллических стержней кинематические гипотезы Кирхгофа-Лява для осевых деформаций стержня имеем выражения

$$\varepsilon(x_i, \xi) = e_0(x_i) + \xi \varkappa_i(x_i), \quad (4)$$

где $e_0(x_i)$ – деформация осевой линии стержня, а \varkappa_i – изменение ее кривизны при изгибе. Тогда обозначая предельно допустимую деформацию i -го фазового материала через $\tilde{\varepsilon}_i$ получим следующие соотношения

$$\Delta_{k1i} = \frac{\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i}}{\tilde{\varkappa}_{ki}}, \quad \Delta_{k2i} = \frac{\tilde{\varepsilon}_{k3i} - \tilde{\varepsilon}_{k2i}}{\tilde{\varkappa}_{ki}}, \quad \Delta_{k3i} = \frac{\tilde{\varepsilon}_{k4i} - \tilde{\varepsilon}_{k3i}}{\tilde{\varkappa}_{ki}}. \quad (5)$$

Так как $\Delta_{kji} > 0$ и $\tilde{\varkappa}_{ki} > 0$, то из этих равенств следует

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{k2i} > \tilde{\varepsilon}_{k1i}, \quad \tilde{\varepsilon}_{k3i} > \tilde{\varepsilon}_{k2i}, \quad \tilde{\varepsilon}_{k4i} > \tilde{\varepsilon}_{k3i}, \dots, \\ 2\tilde{\varepsilon}_{k2i} > (\tilde{\varepsilon}_{k1i} + \tilde{\varepsilon}_{k3i}), \quad (\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i}) > (\tilde{\varepsilon}_{k3i} - \tilde{\varepsilon}_{k2i}). \end{aligned} \quad (6)$$

Эти неравенства устанавливают необходимые правила расположения материалов слоев с рациональной структурой и связи с предельно допустимыми искривлениями соответствующих гибридных стержней при их изгибании.

Исключая $\tilde{\varkappa}_{ki}$ получим зависимости

$$\begin{aligned} \Delta_{k2i} &= \frac{(\tilde{\varepsilon}_{k3i} - \tilde{\varepsilon}_{k2i})}{(\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})} \Delta_{k1i}, \quad \Delta_{k3i} = \frac{(\tilde{\varepsilon}_{k4i} - \tilde{\varepsilon}_{k3i})}{(\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})} \Delta_{k1i}, \quad \Delta_{k4i} = \frac{(\tilde{\varepsilon}_{k5i} - \tilde{\varepsilon}_{k4i})}{(\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})} \Delta_{k1i}, \dots, \\ \Delta_{k1i} + \Delta_{k2i} &= \frac{(\tilde{\varepsilon}_{k3i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})}{(\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})} \Delta_{k1i}, \\ \Delta_{k1i} + \Delta_{k2i} + \Delta_{k3i} &= \frac{(\tilde{\varepsilon}_{k4i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})}{(\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})} \Delta_{k1i}, \\ \Delta_{k1i} + \Delta_{k2i} + \Delta_{k3i} + \Delta_{k4i} &= \frac{(\tilde{\varepsilon}_{k5i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})}{(\tilde{\varepsilon}_{k2i} - \tilde{\varepsilon}_{k1i})} \Delta_{k1i}, \\ &\dots \end{aligned} \quad (7)$$

устанавливающие связи толщин всех слоев с толщинами базовых слоев Δ_{k1i} .

Чтобы определить толщины базовых слоев прогнозируемого проекта высотного сооружения далее в постановочной части необходимо конкретизировать условия внешних механических воздействий на создаваемое сооружение, а также экономические и ресурсные требования для успешного завершения разрабатываемого проекта.

Главные внешние воздействия на высотные сооружения связаны с воздействием интенсивных ветровых потоков, массовыми нагрузками, создаваемыми собственным весом материалов проектируемого сооружения, и поверхностными нагрузками специальных назначений в верхней части небоскребов.

Распределение этих нагрузок по поверхности создаваемого сооружения заранее известно и обычно характеризуется малой изменчивостью в горизонтальном сечении и довольно большой изменчивостью в вертикальном направлении. Эти нагрузки для конкретного проекта считаются известными и обычно не содержат изменяемых параметров проектирования. Массовые нагрузки разделяются на две подгруппы. Массовые нагрузки для элементов ограждения от внешних пространств и соседних блоков заранее известны и не содержат элементов рационального проектирования. Проектируемые гибридные части блоков, наоборот, содержат параметры проектирования и могут достаточно сильно изменяться как с точки зрения материальных ресурсов, так и с точки зрения общих экономических затрат.

Рассмотрим схематическую форму многопролетных высотных зданий (рис. 1).

Массовый расход материалов, необходимый для создания элементов выделенного ($k \sim i$) – блока конструкции может быть представлен в форме

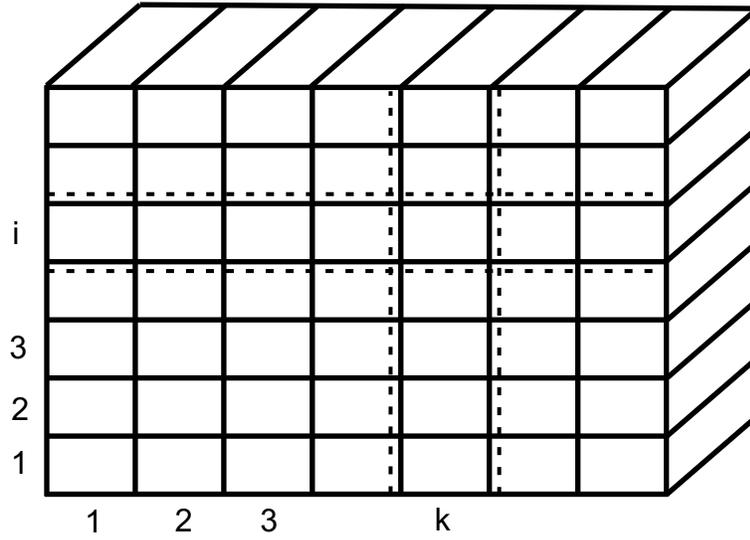


Рис. 1. Схема многоэтажного здания

$$\begin{aligned}
 G_{ki} &= G_{ki1} + G_{ki2} + G_{ki3} + G_{ki4}, \\
 G_{ki1} &= 2l_2l_3 \sum_{j=1}^{n_{1i}} (\rho_{kij} \Delta_{kij}), \quad G_{ki3} = 2l_1l_2 \sum_{j=1}^{n_{3i}} (\rho_{kij} \Delta_{kij}), \\
 G_{ki2} &= l_1l_3 \sum_{j=1}^{n_{2i}} (\rho_{kij} \Delta_{kij}) \left(1 - \frac{a}{l_1}\right) \left(1 - \frac{b}{l_3}\right),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где ρ_{kij} , Δ_{kij} – удельная плотность и толщина в направлении j -го материала в блоке ($k \sim i$), $\frac{a}{l_1}$, $\frac{b}{l_3}$ – относительные размеры оконного проема и G_{ki4} – общий массовый расход всех ограждающих конструкций в ($k \sim i$) – блоке.

Общая экономическая стоимость необходимых для ($k \sim i$) – блока товаров будет равна

$$\begin{aligned}
 \Phi_{ki} &= \Phi_{ki1} + \Phi_{ki2} + \Phi_{ki3} + \Phi_{ki4}, \\
 \Phi_{ki1} &= 2l_2l_3 \sum_{j=1}^{n_{1i}} (c_{kij} \rho_{kij} \Delta_{kij}), \quad \Phi_{ki3} = 2l_1l_2 \sum_{j=1}^{n_{3i}} (c_{kij} \rho_{kij} \Delta_{kij}), \\
 \Phi_{ki2} &= l_1l_3 \left(1 - \frac{a}{l_1}\right) \left(1 - \frac{b}{l_3}\right) \sum_{j=1}^{n_{2i}} (c_{kij} \rho_{kij} \Delta_{kij}),
 \end{aligned}$$

где c_{kij} – удельные стоимости фазовых материалов и Φ_{ki4} – полные стоимости ограждающих конструкций в блоке ($k \sim i$).

3. Основные соотношения предельных состояний одноосных полиметаллических слоистых стержней при продольно-поперечных изгибаниях

В рамках описанных выше допустимых условий эксплуатации исследуемые элементы будут деформироваться элементы одноосных стержней при продольно-поперечных изгибаниях.

Тогда в системе декартовых координат с вертикальной осью x_3 , проходящую через центр опорного прямоугольного основания с размерами l_1 и l_2 будем иметь уравнения равновесия

$$dN = \alpha_3^0(x_3)G_{ki}(x_3)dx_3, \quad x_{3j}^0 \leq x_3 \leq x_{3j}^0 + h_j, \quad (9)$$

$$\frac{dM}{dx} = Q, \quad \frac{d^2M}{dx_3^2} = q_0\varphi(x_3), \quad (10)$$

где $N(x_3)$, $Q(x_3)$, $M(x_3)$ – продольная перерезающая сила и изгибающий момент, q_0 и $\varphi(x_3)$ – амплитуда и закон изменения распределенной вдоль оси x_3 ветровой нагрузки.

Осевая деформация определяется равенством

$$\varepsilon(x_3, \xi) = e_0(x_3) + \xi\kappa(x_3s), \quad (11)$$

$$e_0(x_3) = \frac{du_0(x_3)}{dx_3}, \quad \kappa = -\frac{d^2w}{dx_3^2}, \quad (12)$$

где $u_0(x_3)$ – осевое перемещение, $w(x_3)$ – прогиб оси стержня при изгибе.

При интегрировании уравнений (9), (10) должны соблюдаться условия непрерывности усилий N , Q и изгибающего момента M , а также граничные условия

$$N(H) = -P, \quad M(H) = M_0, \quad Q(H) = Q_0. \quad (13)$$

Величины P , M_0 , Q_0 являются заданными внешними нагрузками в высшей точке $x_3 = H$.

При интегрировании соотношений (12) должны выполняться кинематические условия закрепления

$$u_0(0) = 0, \quad w(0) = 0, \quad \left. \frac{dw}{dx_3} \right|_{x_3=0} = 0. \quad (14)$$

Связи продольного усилия N и изгибающего момента M с деформационными характеристиками e_0 и κ определяются выражениями

$$N = \sum_{j=1}^{n_i} \left[\int_{-l_2}^{l_2} (A_j \Delta_j (e_0 + \xi\kappa) + B_j \Delta_j (e_0 + \xi\kappa)^3) d\xi \right], \quad (15)$$

$$M = \sum_{j=1}^{n_i} \left[\int_{-l_2}^{l_2} (A_j \Delta_j (e_0 + \xi\kappa) + B_j \Delta_j (e_0 + \xi\kappa)^3) \xi d\xi \right].$$

При интегрировании уравнений равновесия получим

$$Q(x_3) = Q_0 + \int_H^{x_3} \varphi(x) dx,$$

$$M(x_3) = M_0 + Q_0(x_3 - H) + q_0 \int_H^{x_3} \left[\int_H^{x_3} \varphi(x) dx \right] dx.$$

В точке заземления $x_3 = 0$ изгибающий момент достигнет значения $-\tilde{M}^*$ и амплитуда распределенной нагрузки - значения q_0^* . Таким образом получим равенство

$$M_0 - HQ_0 + q_0^* \int_H^0 \left[\int_H^{x_3} \varphi(x) dx \right] dx = -\tilde{M}^*. \quad (16)$$

В пределах $0 \leq x_3 \leq H$ максимальный изгибающий момент будет реализован в точке с координатой x_3^* , которая соответствует условию

$$\left. \frac{dM}{dx} \right|_{x_3=x_3^*} = 0$$

и определяется из уравнения

$$Q_0 + q_0^* \int_H^{x_3^*} \varphi(x) dx = 0. \quad (17)$$

В итоге получим уравнение

$$M_0 + Q_0(x_3^* - H) + q_0^* \int_H^{x_3^*} \left[\int_H^{x_3^*} \varphi(x) dx \right] dx = \tilde{M}^*. \quad (18)$$

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Немировский Ю. В. Об оценке веса пластических оптимальных конструкций // Инженерный журнал. Механика твердого тела. АН СССР. 1968. № 4. С. 159–162.
- [2] Немировский Ю. В. Об учете веса при проектировании конструкций в условиях ползучести // Инженерный журнал АН СССР. Механика твердого тела. 1970. № 4. С. 113–123.
- [3] Немировский Ю. В. Равнопрочные слоистые упругие арки и балки // Известия вузов. Строительство. 1996. № 8. С. 113–123.
- [4] Вохмянин И. В., Немировский Ю. В. Оптимальное проектирование равнопрочных слоистых статически неопределимых балок // Известия вузов. Строительство. 1996. № 8. С. 15–25.
- [5] Вохмянин И. В., Немировский Ю. В. О проектировании равнопрочных слоистых балок минимального веса и стоимости с учетом температуры // Проблемы оптимального проектирования сооружений. Доклады всероссийского семинара в двух частях. Часть 2 / НГАСУ. Новосибирск: 1997. С. 39–46.
- [6] Вохмянин И. В., Немировский Ю. В. Оптимальное проектирование равнопрочных слоистых статически неопределимых упругих балок // Известия вузов. Строительство. 1996. № 12. С. 19–27.
- [7] Вохмянин И. В., Немировский Ю. В. Оценки и критерий оптимального проектирования жестко-пластических элементов конструкций минимального объема // Известия вузов. Строительство. 1996. № 3. С. 20–25.
- [8] Немировский Ю. В. Мозаичное проектирование слоистых балок // Известия вузов. Строительство. 2002. № 10. С. 14–19.
- [9] Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 130 с.

- [10] Ржаницын А. Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. М.: Госстройиздат, 1954. 304 с.
- [11] Немировский Ю. В. Обратные задачи механики тонкостенных конструкций // Механика композиционных материалов. 2001. № 5/6. С. 655–668.
- [12] Немировский Ю. В. Синтез плоских ферменных композитных конструкций // Проблемы оптимального проектирования сооружений. Доклады всероссийского семинара в двух частях. IV Всероссийский семинар, 3-5 апреля 2002 / НГАСУ. Новосибирск: 2002. С. 274–281.
- [13] Немировский Ю. В., Мищенко А. В., Вохмянин И. В. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем. Новосибирск: НГАСУ, 2004. 488 с.
- [14] Мищенко А. В., Немировский Ю. В. Структурно неоднородные профилированные стержневые системы. Palmatium Academic Publishing, 2016.
- [15] Король В. К., Гильденгорн М. С. Основы производства многослойных металлов. М.: Metallurgia, 1978. 237 с.
- [16] Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. М.-Л. 1967.
- [17] Немировский Ю. В., Пятаев С. Ф. Граница упругого поведения композитных материалов с полыми сферическими включениями и переходной зоной // Механика композитных материалов. 1988. № 4. С. 636–643.
- [18] Немировский Ю. В. Прогнозирование нелинейного деформирования гибридных композитных материалов // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела. Труды второй Международной конференции / Казанский госуниверситет. Казань: 2009.
- [19] Немировский Ю. В. Допредельное деформирование армированных бетонных конструкций // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2018. № 3(37). С. 26–37.
- [20] Немировский Ю. В. Метод расчета композитных стержневых систем из разномодульных материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы всероссийской научной конференции / ТГУ. Томск: 2006. С. 288–290.
- [21] Немировский Ю. В. Второе предельное состояние однородных и композитных балок // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2009. № 1. С. 150–159.
- [22] Немировский Ю. В., Моховнев Д. В. Устойчивость гибридного композитного стержня в условиях высоких температур // Омский научный вестник. 2019. Т. 3, № 4. С. 16–25.
- [23] Немировский Ю. В. Прогнозирование нелинейного деформирования гибридных композитных стержневых элементов // Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов. Труды всероссийской юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70-летию со дня основания СибНИА / Новосибирск. СибНИА: 2011. С. 261–263.
- [24] Немировский Ю. В. Второе предельное состояние круглых и кольцевых пластин // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 1(23). С. 189–195.
- [25] Немировский Ю. В. Предельное состояние слоистых выпуклых пластин с прямым углом контура // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2020. № 3(45). С. 120–129.
- [26] Немировский Ю. В. Оптимальное проектирование гибридных тавровых балок по предельным допустимым деформациям // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2016. № 3(29). С. 76–84.
- [27] Гордеев В. Н., Лантух-Лященко А. И. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: Издательство АСВ, 2006. 482 с.
- [28] Беспрозванная И. М., Соколов А. Г., Фомин Г. М. Воздействия ветра на высокие сплошностенчатые сооружения. М.: Стройиздат, 1976. 183 с.
- [29] Ветюнов Ю. М., Елисеев В. В. Моделирование каркасов зданий как пространственных стержневых систем с геометрической и физической нелинейностью // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, № 3. С. 32–45.
- [30] Ведяков И. И., Конин Д. В., Кониная С. М. О совершенствовании отечественных сортов для развития их применения в современных металлических конструкциях // Вестник НИЦ Строительство. 2014. № 11. С. 20–29.

-
- [31] Ведяков И. И., Мельникова Е. И. Тенденции мирового высотного строительства // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 31(50). С. 47–53.
- [32] Баранов А. О. Конструктивные решения высотных зданий // Alfabuild. 2018. № 3(6). С. 33–51.
- [33] Шукина М. Н. Современное высотное строительство. ГУП ИТЦ Москомархитектуры, 2007. 440 с.
- [34] Магай А. А. Архитектурное проектирование высотных зданий и комплексов. М.: Изд-во АСВ, 2015. 328 с.
- [35] Маклакова Т. Г. Высотные здания. Градостраительные и архитектурно-конструктивные проблемы проектирования. М.: Изд-во АСВ, 2008. 160 с.
- [36] Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Конструкции зданий: учебник для строительных вузов / В. В. Горев, Б. Ю. Уваров, В. В. Филиппов [и др.]. М.: Высшая школа, 2004. 528 с.

Yu. V. Nemirovskii

RATIONAL DESIGN OF HYBRID POLYMETALLIC STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT MASS LOADS*S. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia**Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia*

Abstract. The problem of rational (optimal) design of high-rise or administrative and management structures with the active use of hybrid polymetallic standardized elements, created on the basis of various reliably developed technologies, is considered. The purpose of solving the problem is the selection and redistribution of materials, in which, with the provision of the required comfortable and safe conditions of existence, the economic indicators of the project being created will be significantly improved. Three differences in the deformability criterion of phase materials under conditions of specified types and fields of external loads, developed by the author, were used as guaranteed requirements for comfortable existence. The first criterion: "maximum permissible elastic state when none of the phase materials will deform beyond the elastic limit. The second criterion: "maximum permissible hardening deformations when phase materials do not pass into a softening state. The third criterion: "maximum permissible fracture strains when any of the phase materials will "locally"fail. The calculations take into account that a number of physical characteristics of materials in a wide range of technological processing rather stably retain their values and are used as data known in advance from the reference literature. These include the limits of elasticity and strength, Young's moduli, specific densities and costs of phase materials. Such a low-sensitivity technological stability made it possible for all phase materials to use a uniform dependence in the form of a cubic parabola for approximating the deformation diagram of various metallic materials, the coefficients of which and the above three maximum permissible deformations are expressed in terms of stable characteristics - the limits of elasticity, strength and Young's modulus. On the basis of the known kinematic and static hypotheses of the description of inelastic deformation of rod systems for all types of maximum permissible deformations, uniform systems of equations are obtained that allow for the given conditions of external action to determine the geometric parameters and the topological structure of the distribution of all phase materials over the structure. Traditional wind loads with a given law of variation along the vertical axis, given moments and forces on the upper vertical cut, and mass loads varying during topological redistributions are considered as external influences on the structure of a high-rise structure. The degree of improvement of the project is estimated based on the analysis of changes in the entered relative characteristics of bearing capacity, flexibility and cost of the project. For comparison, a reference design from a homogeneous material is used.

Keywords: hybrid polymetallic structures, phase materials, distribution topology, specific densities and costs of phase materials, elastic modulus, limits of elasticity and strength, maximum permissible elastic deformations (first), onset of softening (second) and onset of local destruction (third), load-bearing capacity and flexibility of hybrid designs, relative material costs and relative costs of hybrid designs, reference designs

REFERENCES

Nemirovskii Yuri Vladimirovich, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Leading Research Worker, S. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia, Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

- [1] Neimirovsky Yu. V. On the estimation of the weight of optimal plastic structures // Engineering journal. Rigid Body Mechanics. Academy of Sciences of the USSR. 1968. № 4. C. 159–162.
- [2] Neimirovsky Yu. V. On the Consideration of Weight in the Design of Structures in Creep Conditions // Engineering journal of the USSR Academy of Sciences. Rigid Body Mechanics. 1970. № 4. C. 113–123.
- [3] Neimirovsky Yu. V. Equally strong layered elastic arches and beams // News of universities. Building. 1996. № 8. C. 113–123.
- [4] Vokhmyanin I. V., Neimirovsky Yu. V. Optimal design of equal-strength layered statically indeterminate beams // News of universities. Building. 1996. № 8. C. 15–25.
- [5] Vokhmyanin I. V., Neimirovsky Yu. V. About the design of equal strength laminated beams of minimum weight and cost, taking into account temperature // Problems of optimal design of structures. Reports of the All-Russian Seminar in two parts. Part 2 / NGASU. Novosibirsk: 1997. C. 39–46.
- [6] Vokhmyanin I. V., Neimirovsky Yu. V. Optimal design of equal-strength layered statically indeterminate elastic beams // News universities. Building. 1996. № 12. C. 19–27.
- [7] Vokhmyanin I. V., Neimirovsky Yu. V. Estimates and criterion for the optimal design of rigid-plastic structural elements of minimum volume // News universities. Building. 1996. № 3. C. 20–25.
- [8] Neimirovsky Yu. V. Mosaic Design of Laminated Beams // News of universities. Building. 2002. № 10. C. 14–19.
- [9] Rzhantsyn A. R. Composite Bars and Plates. M.: Stroyizdat, 1986. 130 c.
- [10] Rzhantsyn A. R. Calculation of structures taking into account the plastic properties of materials. M.: Gosstroyizdat, 1954. 304 c.
- [11] Neimirovsky Yu. V. Inverse problems of the mechanics of thin-walled structures // Mechanics of Composite Materials. 2001. № 5/6. C. 655–668.
- [12] Unspoken I. M., Sokolov A. G., Fomin G. M. Impact of wind on high solid-wall structures. M.: Stroyizdat, 1976. 183 c.
- [13] Gordeev V. N., Lantukh-Lyashchenko A. I. Loads and impacts on buildings and structures. M.: Publisher ACV, 2006. 482 c.
- [14] Neimirovsky Yu. V. Synthesis of flat truss composite structures // Problems of optimal design of structures. Reports of the All-Russian Seminar in two parts. IV All-Russian Seminar, 3-5 April 2002 / NGASU. Novosibirsk: 2002. C. 274–281.
- [15] Neimirovsky Y. V., Mishchenko A. V., Vokhmyanin I. V. Rational and optimal design of layered rod systems. Novosibirsk: NGASU, 2004. 488 c.
- [16] Mishchenko A. V., Neimirovsky Yu. V. Structurally heterogeneous profiled bar systems. Palmatium Academic Publishing, 2016.
- [17]
- [18] Physical properties of steels and alloys used in power engineering. M.-L. 1967.
- [19] Neimirovsky Yu. V., Pyataev S. F. The boundary of elastic behavior of composite materials with hollow spherical inclusions and a transition zone // Mechanics of Composite Materials. 1988. № 4. C. 636–643.
- [20] Neimirovsky Yu. V. Predicting Nonlinear Deformation of Hybrid Composite Materials // Problems of nonlinear mechanics of deformable solids. Proceedings of the Second International Conference / Kazan State University. Kazan: 2009.
- [21] Neimirovsky Yu. V. Limit deformation of reinforced concrete structures // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovleva. Series: Mechanics of Limit State. 2018. № 3 (37). C. 26–37.
- [22] Neimirovsky Yu. V. Method for calculating composite rod systems from multi-modular materials // Fundamental and applied problems of modern mechanics. Materials of the All-Russian Scientific Conference / TSU. Tomsk: 2006. C. 288–290.
- [23] Neimirovsky Yu. V. Second limit state of homogeneous and composite beams // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovleva. Series: Mechanics of Limit State. 2009. № 1. C. 150–159.
- [24] Neimirovsky Y. V., Mokhovnev D. V. Stability of the hybrid composite rod at high temperatures // Omsk Scientific Bulletin. 2019. T. 3, № 4. C. 16–25.
- [25] Neimirovsky Yu. V. Predicting Nonlinear Deformation of Hybrid Composite Bar Elements // Aerodynamics and strength of aircraft structures. Proceedings of the All-Russian Jubilee Scientific

- and Technical Conference dedicated to the 70th anniversary of the founding of SibNIA / Novosibirsk. SibNIA: 2011. С. 261–263.
- [26] Nemirovsky Yu. V. Second limit state of circular and annular plates // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovleva. Series: Mechanics of Limit State. 2015. № 1 (23). С. 189–195.
- [27] Nemirovsky Yu. V. Limit state of layered convex plates with a right angle contour // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovleva. Series: Mechanics of Limit State. 2020. № 3 (45). С. 120–129.
- [28] Nemirovsky Yu. V. Optimal Design of Hybrid T-Beams for Maximum Allowable Deformations // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovleva. Series: Mechanics of Limit State. 2016. № 3 (29). С. 76–84.
- [29] Vetyunov Yu.M., Eliseev V.V. Modeling building frames as spatial bar systems with geometric and physical nonlinearity // Computational Continuum Mechanics. 2010. Т. 3, № 3. С. 32–45.
- [30] Vedyakov I. I., Konin D. V., Konina S. M. On the improvement of domestic assortments for the development of their application in modern metal structures // Bulletin of SIC Construction. 2014. № 11. С. 20–29.
- [31] Vedyakov I. I., Melnikova E. I. Trends in world high-rise construction // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2013. Т. 31 (50). С. 47–53.
- [32] Baranov A.O. Constructive solutions for high-rise buildings // Alfabuild. 2018. № 3 (6). С. 33–51.
- [33] Shukina M.N. Modern high-rise construction. GUP ITC Moskomarkhitektura, 2007. 440 с.
- [34] Magai A. A. Architectural design of high-rise buildings and complexes. М.: Publishing house ASV, 2015. 328 с.
- [35] Maklakova T. G. High-rise buildings. Urban planning and architectural design problems. М.: Publishing house ASV, 2008. 160 с.
- [36] Metal structures. In 3 volumes. V. 2. Structures of buildings: textbook for construction universities / V. V. Gorev, B. Yu. Uvarov, V. V. Filippov [и др.]. М.: High School, 2004. 528 с.