ISSN 1814-5566
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS
9, N1 (2006) 13-19
УДК 69.059.4

(06)-0100-1

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ І НАДІЙНОСТІ МЕТАЛЕВОЇ БАЛКИ

В.С. Уткін, О.С. Плотнікова
Вологодський державний технічний університет,
вул. Леніна 15, 160000, м. Вологда, Росія.
E-mail: pgs@mh.vstu.edu.ru

Отримана 7 липня 2005; прийнята 20 жовтня 2005

Анотація. У статті пропонується нова методика визначення залишкової несучої здатності металевої балки шляхом навантаження її постійною за значенням і місцем прикладення безпечним випробувальним навантаженням. Наводяться приклади з визначення резервів несучої здатності металевої балки, також пропонується методика визначення надійності металевої балки на основі теорії можливостей для тих випадків, коли застосування імовірнісних методів стає некоректним.

Ключові слова: несуча здатність, металева балка, надійність, метод можливостей, гранична рівновага.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ БАЛКИ

В.С. Уткин, О.С. Плотникова
Вологодский государственный технический университет,
ул. Ленина 15, 160000, г. Вологда, Россия.
E-mail: pgs@mh.vstu.edu.ru

Получена 7 июля 2005; принята 20 октября 2005

Аннотация. В статье предлагается новая методика определения остаточной несущей способности металлической балки путем нагружения ее постоянной по значению и месту приложения безопасной испытательной нагрузкой. Приводятся примеры по выявлению резервов несущей способности металлической балки, также предлагается методика определения надежности металлической балки на основе теории возможностей для тех случаев, когда применения вероятностных методов становится некорректным.

Ключевые слова: несущая способность, металлическая балка, надежность, возможностный метод, предельное равновесие.

DEFINITION OF A RESIDUAL LOAD-CARRYING CAPACITY AND RELIABILITY OF METAL BEAM

V.S. Utkin, O.S. Plotnikova
The Vologda State Technical University, Lenin street. 15, 160000, Vologda, Russia.
E-mail: pgs@mh.vstu.edu.ru

Received 7 July 2005; accepted 20 October 2005

Abstract. In the article the new technique of definition of residual bearing ability of metal structures by loading to their constant on value and a place of the appendix by safe test loading is offered. Examples on revealing reserves of bearing ability metal designs are resulted, the technique of definition of reliability of metal designs also on the basis of the theory of opportunities for those cases when application of probability methods becomes incorrect is offered.

Keywords: rod design, reliability, method of opportunities, limiting balance.

Металлические конструкции нашли широкое применение в промышленном, социальном и жилищном строительстве. Сроки эксплуатации их во многих случаях превысили проектную долговечность и под влиянием окружающей среды и других непредвиденных воздействий (пожаров, наводнений, взрывов и т.п.), их техническое состояние вызывает объективное беспокойство в обеспечении необходимого уровня безопасности эксплуатации.

Основной мерой безопасности конструкций является надежность. Известно [1], что для оценки надежности любых конструкций необходима математическая модель предельного состояния; законы распределения случайных величин - определяющих параметров модели; представительная статистическая информация о параметрах распределений. К сожалению, в реальных условиях для многих конструкций и моделей предельного состояния такой информации нет. Всевозможные предположения о характере поведения случайных величин и о законах их распределения только повышают степень неопределенности и к результатам расчетов надежности относятся соответственно с недоверием, а чаще эти расчеты вообще не выполняют. Значит, мера безопасности эксплуатации несущих элементов остается неизвестной.

В то же время в ряде случаев можно выявить резерв в несущей способности в существующих конструкциях и достаточную их надежность (безопасность), и не прибегать к дорогостоящим капитальному ремонту или реконструкции.

Предлагается новая методика определения остаточной несущей способности и надежности металлической балки на основе теории возможностей для тех случаев, в которых вероятностные методы становятся некорректными из-за отсутствия достаточных по объему и качеству статистических данных в параметрах математических моделей предельного состояния [2].

Сущность методики заключается в следующем: металлическая балка или ее отдельный элемент нагружается постоянной по значению и месту приложения безопасной испытательной нагрузкой равной 10-20% от проектной или теоретически определенной предельной нагрузки. Предварительно балка освобождается от некоторой существующей нагрузки (от оборудования, транспорта, подкрановая балка освобождается от действия тележек крана и т.д.) Так как любой результат измерения является случайным числом (включая и влияние человеческого фактора), то нагружение балки осуществляется не менее 5 раз [3], и каждый раз производится измерение деформации в наиболее напряженном месте балки. Если установить такое место затруднительно, то деформацию измеряют в нескольких «опасных» местах.

Из-за неравномерного распределения усилий по ширине балки, вызванного различными причинами (статическими, геометрическими, монтажными и т.д.), из двух результатов измерений ε на каждой полке балки принимается наибольшее. Затем определяется наибольшее напряжение по закону Гука $\sigma_i = \varepsilon_i \cdot \mathrm{E}$, где E — модуль упругости стали или другого металла с линейной зависимостью между σ и ε, $i = 1,2,\ldots,n$, n - число испытаний балки. По результатам испытаний, на основании рекомендаций в работах [3,4] строится диаграмма $F - \sigma$, схематический вид которой представлен на рис.1.

$\overline{\sigma}_u$ — среднее значение напряжения от испытательной нагрузки F_u, $\overline{\sigma}_u = \sum \sigma_i / n$, $2\Delta_\sigma$ — ширина доверительного интервала напряжения, как случайной величины. При малом числе измерений ε_i и при неизвестном законе его распределения по [5] принято $2\Delta_\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$, где $\varepsilon_{\max}$ и $\varepsilon_{\min}$ выбираются из вариационного ряда результатов измерений $\{\varepsilon_i\}$ $2\Delta_\sigma = E \cdot 2\Delta_\varepsilon$. В качестве предельного напряжения в металлических конструкциях принимается значение предела текучести σ_T или $\sigma_{0,2}$. Значение $2\Delta_{\sigma_T}$ можно найти по результатам определения σ_T при испытании образцов из металла конструкций. Если предположить, что σ_T изменяется по нормальному закону распределения, то можно принять $2\Delta_{\sigma_T} = 4S_{\sigma_T}$ с вероятностью 0,95, откуда $S_{\sigma_T} = \overline{\sigma}_T \cdot \nu_{\sigma_T}$, $\overline{\sigma}_T$ — среднее значение предела текучести металла. $\overline{\sigma}_T$ находят по результатам испытаний образцов из металла конструкций или по нормативным документам, если известна марка стали. В мировой практике в настоящее время на современном уровне металлургического производства коэффициент вариации σ_T принимают по [6] $\nu_{\sigma_T} = (0{,}05 \div 0{,}06)$ и σ_T, как случайная величина, хорошо описывается нормальным (гауссовским) законом распределения.

В результате на диаграмме находят нижнее и верхнее значения предельной нагрузки $F_{np}^{н}$ и F_{np}^{B}. Для определения остаточного резерва несущей способности балки из $F_{np}^{н}$ вычитается имеющаяся нагрузка на балку (от собственного веса, оборудования и т.д.) после замены ее на эквивалентную приложенную там же, где была приложена испытательная нагрузка, для чего уточняется расчетная схема по методике [7] и теоретически, методами строительной механики, вычисляется эквивалентная нагрузка. Подробно об этом можно найти в работе [4].

В целом ряде металлических конструкций, например, в сварных [8], допустимы остаточные

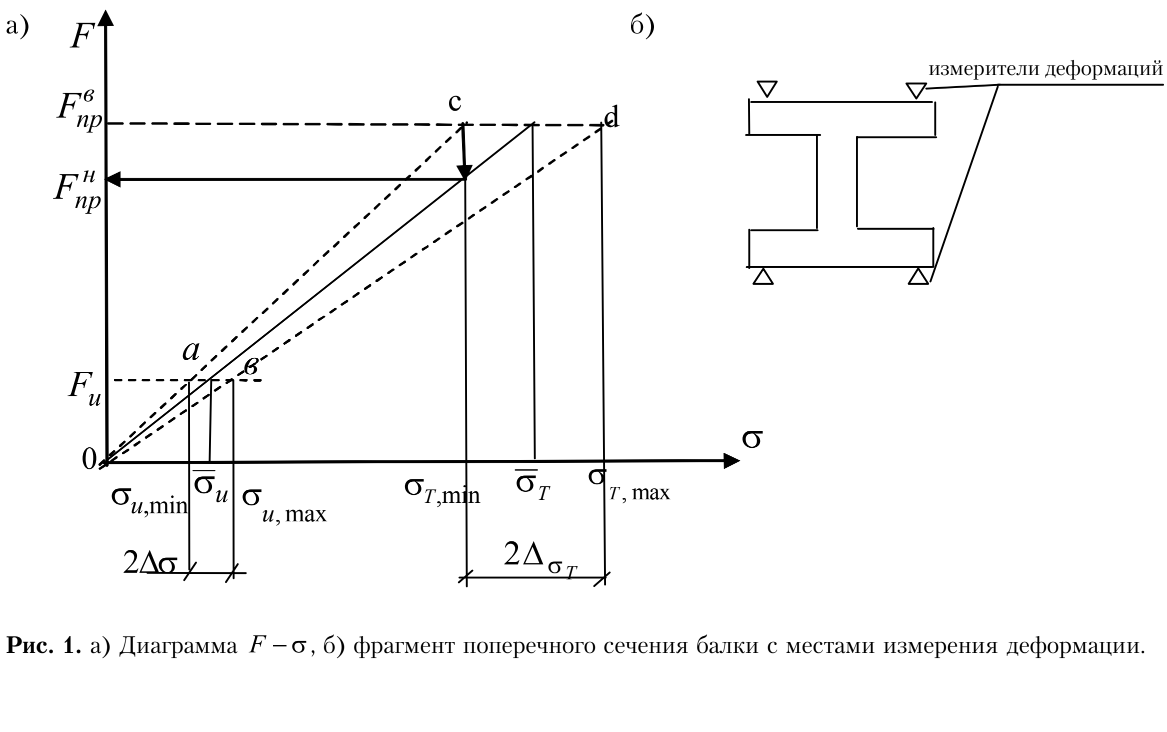

Рис. 1. а) Диаграмма $F - \sigma$, б) фрагмент поперечного сечения балки с местами измерения деформации.

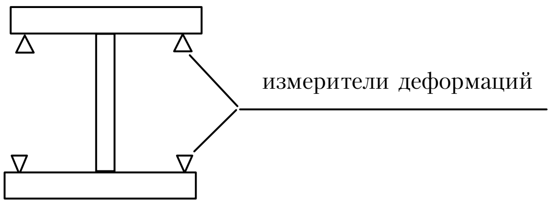

Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения балки с местами измерения деформации.

деформации порядка десятых долей процента, и в этом случае можно пользоваться пределом текучести равным $\sigma_{0,5}$ и даже $\sigma_{1,0}$ [8].

Учитывая существующее соотношение между пределом текучести и пределом прочности (временным сопротивлением) σ_B в виде $\sigma_T \approx 0{,}5\sigma_B$, можно утверждать, что в ряде конструкций имеется запас прочности и можно допустить предельные напряжения, равные σ_T или $\sigma_{0,5}$ и даже $\sigma_{1,0}$, на некоторой глубине поперечного сечения изгибаемого элемента или элемента при сложном нагружении, ограничивая эту глубину условием допустимых остаточных перемещений.

Особый эффект в выявлении резерва несущей способности при этом проявляется в высоких балках с полками большей толщины.

В этом случае измерения деформаций от испытательной нагрузки F_u, для построения диаграммы $F-\sigma$, производят на определенном расстоянии от верхних и нижних поверхностей сечения, как, например, показано на рис. 2.

Рассмотрим пример, приближенный к реальным условиям работы конструктивного элемента в теоретической постановке.

Пусть балка из стали С 245 с расчетным сопротивлением $R_y = 230МПа$ (для полки) пролетом $L = 10{,}0$ м имеет сечение, представленное на рис. 3.

Тогда расчетная предельная нагрузка в соответствии с эпюрой (см. рис. 3, б) будет:

$$F_{пр} = \frac{4W_x R_y}{L} \text{ и } F_{пр} = 868{,}4кН;$$

значения прогиба $f_{\max} = \dfrac{F_{пр}L^3}{48EJ_x}$,

где $J_x = 566340см^4$;

$$f_{\max} = 0{,}015м < [f] = \frac{1}{250}L = 0{,}04м.$$

Предельную нагрузку $F^*_{пр}$ при допущении напряжений равных пределу текучести на глубине 25 мм (см. рис. 3, в) определим по формуле из [11]:

$$F^*_{пр} = \frac{4M_{пр}}{L} \text{ и } F^*_{пр} = 982{,}3кН.$$

Таким образом, эффект от принятого допущения о напряжениях при определении несущей способности составляет 13%.

Значения прогиба при принятом допущении определим по формуле из [11]:

$$f^*_{\max} = f_{\max}\left[\begin{array}{l} 5\left(\dfrac{F_{пр}}{F^*_{пр}}\right)^2 - \left(\dfrac{F_{пр}}{F^*_{пр}}\right)^{1/2} \times \\ \times\left(3\dfrac{F_{пр}}{F^*_{пр}}+1\right)\sqrt{3\dfrac{F_{пр}}{F^*_{пр}}-2} \end{array}\right]$$

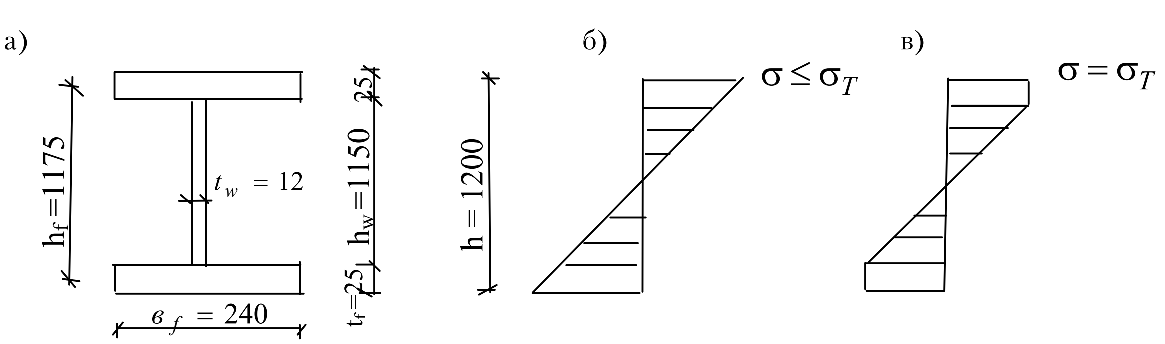

Рис. 3. а) поперечное сечение сварной стальной балки; б) эпюра напряжений в пределах упругости; в) эпюра напряжений при упруго-пластическом деформировании.

В результате расчетов получим $f^*_{\max} = 0{,}017\text{м} < [f] = 0{,}04\text{м}$.

Если посмотреть на рис.1, то в случае допущения напряжений равных σ_T, на некоторой глубине сечения балки, значение σ_u, определяемое по методике [3,4], окажется меньше при том же значении нагрузки F_u и доверительная граница $в - d$ сместится влево, что приведет к повышению значения $F^H_{пр}$.

Рассмотрим методику определения надежности стальной балки.

Из рис. 1 видно, что можно принять линейную зависимость между $\widetilde{F}_{пр}$ и напряжениями $\widetilde{\sigma}_u$ и $\widetilde{\sigma}_T$, т.е. $\widetilde{F}_{пл} = \kappa_1\widetilde{\sigma}_u + \kappa_2\widetilde{\sigma}_T$. На практике иногда приходится иметь дело с ограниченной статистической информацией о $\widetilde{\sigma}_u$ и $\widetilde{\sigma}_T$. Будем их считать нечеткими переменными в понятиях теории возможностей [9]. Тогда и $F_{пр}$ будет нечетной переменной. Значения коэффициентов κ_1 и κ_2 находят по результатам испытаний $F^H_{пр}$ и $F^B_{пр}$. Из рис.1 видно, что $F^H_{пр} = \kappa_1\sigma_{u,max} + \kappa_2\sigma_{T,\min}$ и $F^B_{пр} = \kappa_1\sigma_{u,\min} + \kappa_2\sigma_{T,\min}$.

Рассмотрим пример. Пусть известны

$\sigma_{u,\min} = 20МПа$, $\sigma_{u,\max} = 30МПа$,

$\sigma_{T,\min} = 200МПа$, $\sigma_{T,\max} = 250МПа$,

$F^H_{пр} = 100кН$, $F^B_{пр} = 120кН$.

Тогда имеем систему уравнений

$100 \cdot 10^3 = \kappa_1 30 \cdot 10^6 + \kappa_2 200 \cdot 10^6$ и

$120 \cdot 10^3 = \kappa_1 20 \cdot 10^6 + \kappa_2 200 \cdot 10^6$.

Отсюда $\kappa_1 = -2 \cdot 10^{-3}\text{м}^2, \kappa_2 = 8 \cdot 10^{-4}\text{м}^2$

И еще, из рис. 1 видно, что $\kappa_1 < 0$, $\kappa_2 > 0$, что подтверждается их значениями из решения системы уравнений.

Нечетную переменную $\widetilde{F}_{пр}$ будем характеризовать функцией распределения возможностей (ФРВоз) вида (1) по [2].

$$\pi_{\widetilde{F}_{пр}}\left(F_{пр}\right) = exp\left\{-\left[\left(F_{пр} - a_{F_{пр}}\right)/ в_{F_{пр}}\right]^2\right\}, \quad (1)$$

где $a_{F_{пр}} = 0{,}5\left(F^B_{пр} + F^H_{пр}\right)$.

$$в_{F_{пр}} = 0{,}5\left(F^B_{пр} - F^H_{пр}\right)/\sqrt{-\ell n\alpha}.$$

Значением $\alpha \in [0{,}1]$ задаются (рекомендации об этом можно найти в работе автора [10]).

Если эксплуатационная нагрузка $F_э$ детерминированная, то надежность балки будет характеризоваться значением возможности непревышения значения $F_э$ предельной нагрузки $\widetilde{F}_{пр}$. Для этого сначала сравнивают $F_э$ со средним значением $\widetilde{F}_{пр}$, которое равно $a_{F_{пр}}$. При $F_э < a_{F_{пр}}$ принимают, что возможность безотказной работы конструкции $R = 1$, а возможность отказа по [2] $Q = \pi_{\widetilde{F}_{пр}}\left(F_э\right)$, которую находят по (1), принимая $F_{пр} = F_э$.

Рассмотрим это на примере.

Пусть $a_{F_{пр}} = 110кН$, $в_{F_{пр}} = 7{,}9кН$ при $\alpha = 0{,}2, F_э = 102кН$.

Тогда

$R = 1$,

$Q = \pi_{\widetilde{F}_{пр}}(102) = \exp\left\{-\left[(102 - 110)/7{,}9\right]^2\right\} = 0{,}35$

Необходимость безотказной работы $N = 1 - Q = 0{,}65$.

Надежность балки будет характеризоваться интервалом [1;0,65] при уровне среза (риска) $\alpha = 0{,}2$. Истинная надежность будет внутри этого интервала из условия совместимости [9]

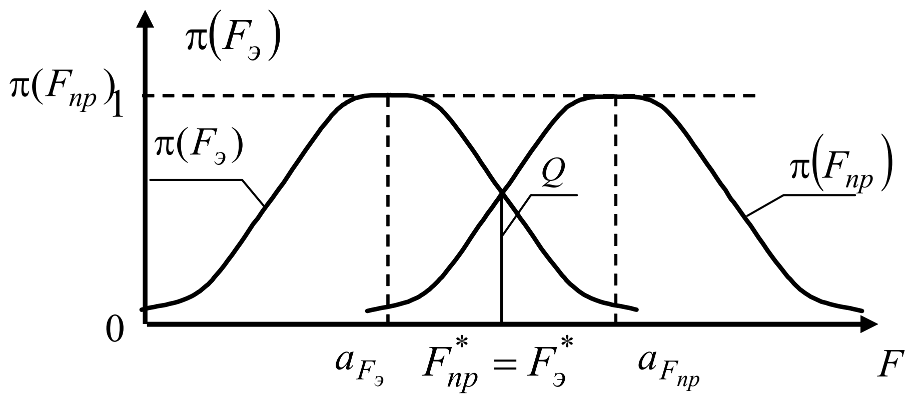

Рис. 3. ФРВоз $\pi_{\widetilde{F}_{пр}}\left(F_{пр}\right), \pi_{\widetilde{F}_{пр}}\left(F_э\right)$.

$N < P < R$, где P — вероятность безотказной работы или истинное значение надежности. Если такое значение надежности мало, то эксплуатационную нагрузку следует уменьшить. Так, при $F_э = 96кН$ будет иметь $Q = 0{,}04$ и $N = 0{,}96$. Интервал надежности будет [1; 0,96].

Если эксплуатационная нагрузка $\widetilde{F}_э$ является нечеткой переменной и характеризуется ФРВоз вида (1), решение представим на рис. 3. Здесь для нахождения меры события (прочность больше нагрузки) для 2-х нечетких переменных по [9] служит метод сравнения функций распределения возможностей этих переменных.

При $a_{F_{пр}} > a_{F_э}$ имеем $R = 1$. Для нахождения Q (см. рис.3), приравниваем ФРВоз типа (1) для $\widetilde{F}_{пр}$ и $\widetilde{F}_э$., т.е. находит точку пересечения обеих ФРВоз. Находим корни этого уравнения при $F^*_{пр} = F^*_э$. Из 4-х корней выбираем тот, который находится в интервале $\left[a_{F_э}, a_{F_{пр}}\right]$ (см. рис. 3). Подставляя его в любое уравнение вида (1), найдем значение Q и затем $N = 1 - Q$.

Рассмотрим пример.

Пусть $a_{F_{пр}} = 110кНБ, в_{F_{пр}} = 7{,}9кН$, при $\alpha = 0{,}2, a_{F_э} = 90кН, в_{F_э} = 4{,}7кН$.

$$\left[\left(F^*_{пр} - 110\right)/7{,}9\right] = \left[\left(F^*_{пр} - 90\right)/4{,}7\right].$$

Отсюда

$F^*_{пр} = 97{,}5кН,\ Q = 0{,}082,\ N = 0{,}918$. Надежность будет характеризоваться интервалом [1; 0,918] при уровне среза (риска) $\alpha = 0{,}2$.

Вывод

1. Предложена методика определения предельной нагрузки металлической балки как меры несущей способности и показана возможность ее повышения за счет допущения пластических деформаций в поперечных сечениях балок.
2. Предложена новая методика определения надежности металлических конструкций для случая ограниченной информации о воздействиях и объектах, когда применение вероятностных методов становится некорректным из-за ограниченности или неточности статистической информации.

Литература

1. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: Изд-во АСВ, 1998.-304 с.
2. Уткин В.С., Уткин Л.В. Определение надежности строительных конструкций: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. – Вологда: ВоГТУ, 2000 – 126 с.
3. Уткин В.С. Патент № 2006813 на изобретение «Способ неразрушающего контроля прочности строительных конструкций», 1994.
4. Уткин В.С., Уткин Л.В. Несущая способность и надежность строительных конструкций. Монография – Вологда: ВоГТУ, 2000. – 152 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование экспериментов в технике и науке. Методы обработки данных. Под ред. Э.К. Лецкого – М.: МИР, 1980. – 610 с.
6. Аугусти Г., Баратта А., Кашмати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. (Пер. с анг.). – М.: Стройиздат, 1988. – 580 с.
7. Уткин В.С., Погодин Д.А. Патент на изобретение № 2176388 «Способ экспериментально-теоретического определения жесткости опорных и узловых закреплений строительных конструкций». 2001.
8. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Изд. 3-е, перераб. и доп. часть вторая. М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
9. Дюбуа Л., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
10. Уткин В.С. Значение уровня риска в теории возможностей // Строительные материалы. 2004, №8. – 35с.
11. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: «Машиностроение», 1968, - 400 с.

Уткін Володимир Сергійович є професором кафедри "Промислове та цивільне будівництво" Вологодського державного технічного університету, заслужений працівник Вищої Школи РФ. Наукові інтереси: неруйнуючі методи визначення несучої здатності будівельних конструкцій, визначення надійності будівельних конструкцій.

Плотнікова Ольга Серафімівна є старшим викладачем кафедри "Промислове та цивільне будівництво" Вологодського державного технічного університету. Наукові інтереси: розрахунок і проектування металевих конструкцій цивільних і промислових будинків, неруйнуючі методи визначення несучої здатності металевих конструкцій, визначення надійності металевих конструкцій.

Уткин Владимир Сергеевич является профессором кафедры "Промышленное и гражданское строительство" Вологодского государственного технического университета, заслуженный работник ВШ РФ. Научные интересы: неразрушающие методы определения несущей способности строительных конструкций, определение надежности строительных конструкций.

Плотникова Ольга Серафимовна является ст. преподавателем кафедры "Промышленное и гражданское строительство" Вологодского государственного технического университета,. Научные интересы: расчет и проектирование металлических конструкций гражданских и промышленных зданий, неразрушающие методы определения несущей способности металлических конструкций, определение надежности металлических конструкций.

Utkin Volodymyr Sergiyovych is the professor of faculty "Industrial and civil construction" of the Vologda state technical university, deserved worker of High School of Russian Federation. Scientific interests: non-destroying methods of definition of carrying capacity of building structures, definition of reliability of building structures.

Plotnikova Olga Serafimivna is the teacher of faculty "Industrial and civil construction" of the Vologda state technical university. Scientific interests: calculation and designing of metal structures of the civil and industrial buildings, non-destroying methods of definition of carrying capacity of building structures, definition of reliability of building structures.