



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

2012, ТОМ 18, НОМЕР 1, 27–39

УДК 624.014:621.771

(12)-0247-1

## КОНСТРУКТИВНА ФОРМА НОМЕР ОДИН

**А. В. Перельмутер**

*НПО СКАД Софт,*

*вул. Івана Клименка, 4, офіс 20, м. Київ, Україна, 03037.*

*E-mail: avp@scadsoft.com*

*Отримана 24 червня 2011; прийнята 24 лютого 2012.*

**Анотація.** У статті йде мова про історію створення і вдосконалення двотаврового профілю як конструктивної форми будівельних металоконструкцій. Викладення дивовижної історії двутавра ускладнюється тим, що багато ідей виникали незалежно у дослідників, конструкторів і технологів, часто без взаємного обміну інформацією. Простежуються джерела головних конструктивних ідей, включаючи і суміжні області техніки, починаючи з початку ХІХ століття і до наших днів. Наводяться деякі відомості про авторів цих ідей. Роботи вчених не використовувалися практичними інженерами, які розвивали конструктивні рішення, інженери поклалися на свою інтуїцію і експерименти, а металурги розвивали свої можливості під впливом інших обставин. Історія становлення та розвитку цієї конструктивної форми номер один не має чіткого початку, а можливості її розвитку та вдосконалення не дають право говорити про закінчення цієї захоплюючої історії.

**Ключові слова:** двотавр, рейка, розвиток металургії, зварювання.

## КОНСТРУКТИВНАЯ ФОРМА НОМЕР ОДИН

**А. В. Перельмутер**

*НПО СКАД Софт,*

*ул. Ивана Клименко, 4, офис 20, г. Киев, Украина, 03037.*

*E-mail: avp@scadsoft.com*

*Получена 24 июня 2011; принята 24 февраля 2012.*

**Аннотация.** Описывается история создания и совершенствования двутаврового профиля как конструктивной формы строительных металлоконструкций. Изложение удивительной истории двутавра затрудняется тем, что многие идеи здесь возникали независимо у исследователей, конструкторов и технологів, зачастую без взаимного обмена сведениями. Прослеживаются истоки основных конструктивных идей, включая и смежные области техники, начиная с начала ХІХ века и до наших дней. Приводятся некоторые сведения об авторах этих идей. Работы ученых не использовались практичными инженерами, которые развивали конструктивные решения, инженеры полагались на свою интуицию и эксперименты, а металлурги развивали свои возможности под влиянием других обстоятельств. История становления и развития этой конструктивной формы номер один не имеет четкого начала, а возможности ее развития и совершенствования не дают право говорить о конце этой увлекательной истории.

**Ключевые слова:** двутавр, рельс, развитие металлургии, сварка.

## THE CONSTRUCTIVE FORM NUMBER ONE

Anatoly Perelmuter

SCAD Soft Co,

4, Ivana Klimenko Str., office 20, Kiev, Ukraine, 03037.

E-mail: [acp@scadsoft.com](mailto:acp@scadsoft.com)

Received 24 June 2011; accepted 24 February 2012.

**Abstract.** The creation and perfection history I-beam profile, as constructive form of a steel design for building is described. Sources of the basic constructive ideas are traced, including and adjacent areas of technique, since the beginning of the XIX th century and up to now. Some facts about the authors of these ideas are given. Practice engineers, which were developing the structural solutions did not use the scientists works. Engineers played their hunches and experiments and metallurgist were developing their possibilities under the influence of other facts. The history of start-up and development of this structural form number one does not have clear origin and possibilities of its development does not confer a right on speaking about the end of its exciting history.

**Keywords:** i-beam, rail, metallurgy development, welding.

*...иногда в этом деле полный туман.  
Например, мы не знаем имени гения,  
Который изобрел ... карман.  
Карман нам буквально как воздух полезен,  
Он прочно вошел в нашу жизнь, в наш быт.  
Мы в него лишь только за словом не лезем,  
А изобретатель его забыт.*

### **В. Ардов. Размышления об изобретениях**

### **1. Введение**

Форма двутавра для металлических конструкций является своеобразным символом, этот символ присутствует во многих эмблемах фирм, занимающихся проектированием, изготовлением и монтажом стальных конструкций. Однако на вопрос: «Кто и когда изобрел двутавр?» профессионалы-металлисты чаще всего отвечают пожатием плеч.

Изложение удивительной истории двутавра затрудняется тем, что многие идеи здесь возникали независимо у исследователей, конструкторов и технологов, зачастую без взаимного обмена сведениями. Работы ученых не использовались практическими инженерами, которые развивали конструктивные решения, инженеры полагались на свою интуицию и эксперименты, а металлурги развивали свои возможности под влиянием других обстоятельств. Становление специфической формы двутав-

рового сечения приходится проследить через ее развитие в рельсах железной дороги, в первых шагах железного судостроения и лишь в последнюю очередь в создании балочных элементов строительного назначения. При этом начальный этап истории демонстрировал преобладающее влияние эксперимента и практики, а не шел от осознанного использования научных идей. Лишь примерно через семьдесят лет положение кардинально изменилось, и теоретический анализ возглавил процесс совершенствования конструктивной формы.

### **2. Эмпирики**

По сравнению с общим развитием металлургии применение металла в строительстве началось относительно поздно. Поэтому стоит кратко вспомнить важнейшие даты.

В 1720 г. Абрахаму Дерби в Колбрукдейле удается выплавить чугун в доменной печи на

коксе вместо древесного угля и этим сделать предпосылки для массового производства доменного чугуна. В 1784 г. после усовершенствования английским металлургом Г. Кортон пудлинговых печей стало возможным переделывать доменный чугун в сварочное железо<sup>1</sup>, которое начинает вытеснять чугун. За короткий период были разработаны основные способы промышленного производства литой стали: бессемеровский (1855 г.), мартеновский (1867 г.), томасовский (1878 г.).

Сразу совместно с огромным скачком в производстве стали наблюдался и прогресс в её обработке: уже в середине XVIII века в Англии начинается прокат листового железа, в 1830 г. – железнодорожных рельсов. Двутавровая балка – основной профиль современного строительства из стали и в то же время первый, строго нормированный строительный элемент – яв-

ляется развитием формы железнодорожного рельса, который можно считать эмблемой индустриального века.

### Рельсы

Развитие формы двутавра началось в поиске профиля рельса. Первый рельс, который имел форму, в какой-то степени похожую на двутавр, был чугунным рельсом приблизительно в 1 метр длиной (рис. 1), запатентованный Джессопом (Jessop) в Англии в 1789 г. Он опирался на дискретно расположенные столбчатые опоры из камня, для чего у его концов была предусмотрена плоская подошва. (рис. 1, сечение В-В).

Такое решение просуществовало более 20 лет пока для рельсов не начали использовать сварочное железо. Только в 1820 году металлурги смогли прокатать рельс таврового типа (рис. 2а).

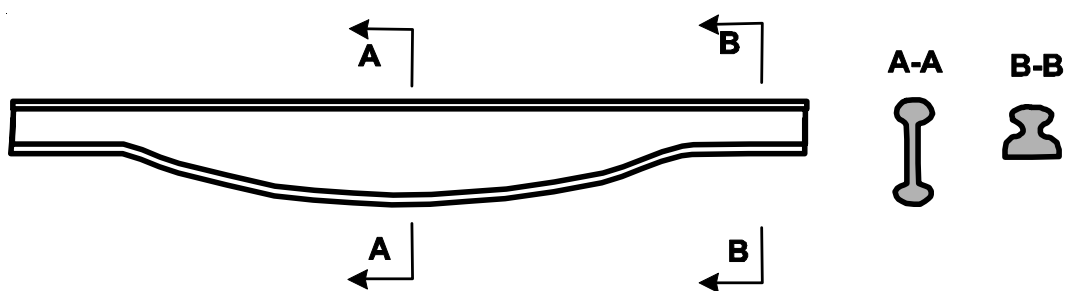


Рисунок 1. Чугунный рельс Джессопа (1798 г.).

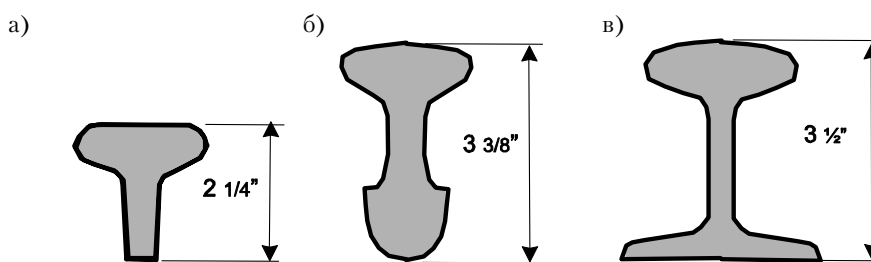


Рисунок 2. Прокатные рельсы: а – Биркеншоу (1820 г.); б – Кларенса (1830 г.); в – Стенвенса (1831 г.).

<sup>1</sup> Сварочное железо – железо, получающееся в пудлинговых печах, из печки поступает непосредственно под обжимной молот, ударами которого выдавливаются шлаки, механически увлеченные железом при пудлинговании; обжатые куски железа обыкновенно тотчас из-под молота идут под вальцы, где они раскатываются в полосы. К восьмидесятым годам XIX века сварочное железо было повсеместно вытеснено литым железом. Термин «литое железо» отнюдь не означает, что изделия из него приготавливаются путем отливки, это обозначение указывает лишь на то, что железо или сталь из чугуна получились в виде слитков.

Джон Биркеншоу (Birkenshaw), британский инженер, получил патент для этого рельса из ковального железа, у которого были немного выпуклая голова и вертикальная стенка. Рельс Кларенса (Clarenc), показанный на рис. 2б, появился в 1830 году, и у него появилось дополнение в форме головки у основания стенки.

Заключительным шагом к двутавровой форме в сварочном железе было создание американского профиля рельса Робертом Стевенсом (Stevens). В 1830 году Стевенса послали в Англию, чтобы купить рельсы и локомотив. Во время этой поездки он задумывал идею плоской подошвы рельса, опирающегося на шпальное основание (рис. 2в), и таким образом появился, так называемый, американский рельс. Его прокатка началась в 1831 году.

## Суда

Первое полностью железное судно было построено в 1818 г. в Шотландии плотником и двумя кузнецами, шпангоуты ковались в угловую форму из плоского листа на специальной наковальне (рис. 3а). Для увеличения мощности шпангоутов их форма развилась от простого уголка до более сложных сечений, как это показано на рис. 3. Во-первых, обратная структура была развита (рис. 3б), была использована комбинация двух уголков, приклепываемых друг к другу для формирования Z-образного профиля. Позже Z-образные профили начали изготавливать кузнечным способом (рис. 3в) как и швеллерные сечения (рис. 3г). Последняя секция была изменена, и появился углобульб (рис. 3д), используемый до сегодняшнего дня. Все эти профили деталей корпуса судна было трудно изготавливать, и практикам металлопрокатного производства потребовалась более чем четверть века для совершенствования методов их прокатки.

Где-то между 1800 и 1819 гг. металлопрокатный завод во Франции произвел первые прокатные уголки из сварочного железа, и в 1830 году уголки были все еще единственными прокатными профилями. Между 1828 и 1830 гг., сначала катали тавр. Этот профиль был весьма маленьким в поперечном сечении и практически не нашел применения в строительстве. Когда в 1847 году был предложен тавр высотой 4 дюйма, французские заводы отказались его катать.

Главные события десятилетия 1830–1840-х гг. состояли в строительстве железных судов. Уильям Фэрбэрн (Fairbairn) из Манчестера был британским инженером, эксперименты которого, начатые в 1838 году, позволили существенно продвинуть знание несущей способности пластин из сварочного железа и других конструкций железных судов [11]. Он был совладельцем верфи, которая строила полностью железные суда, десятилетием позже пионерные исследования Фэрбэрна при проектировании мостов установили возможность использования железа вместо чугуна для строительства знаменитых трубчатых мостов – «Британия» и «Конвей».

При испытаниях новых форм шпангоутов Фэрбэрн сначала использовал составной тавр (рис. 4а), склепанный из двух уголков и пластины. Когда ему представили цельный тавр приблизительно такого же размера (рис. 4б), он нашел, что такой тавр был почти столь же прочным, как клепаные тавры. Однако Фэрбэрн не был полностью удовлетворен сопротивлением этих профилей и справедливо полагал, что форма и пропорция частей с двумя полками приведет к сечению большего сопротивления (рис. 4в). Это сечение было описано как балка из двух стержней, склепанных вместе, предполагалось, что эти стержни до склепки были согнуты вручную в швеллерные профили.

Фэрбэрн заключил, что «стержни с двойными поясами, сформированными из пластины и приклепанных уголков наверху и у основании» (рис. 4г), т. е. двутавровая балка, является самой подходящей для поддержки палуб. Хотя его исследование было закончено в 1839 году, Фэрбэрн не издавал свои результаты до 1850 года и во многом упустил свой приоритет.

## Междуэтажные перекрытия

Первый шаг в развитии конструктивной формы был связан с повышением огнестойкости сводчатых кирпичных перекрытий на текстильных фабриках Англии. Для поддержки сводов использовались деревянные балки с клиновидными накладками (рис. 5а). Эта же конструктивная форма была использована, когда клиновидные уширения стали частью чугунной балки (рис. 5б), в перекрытии текстильной фабрики Шрусбери, построенной в 1796–1797 гг.

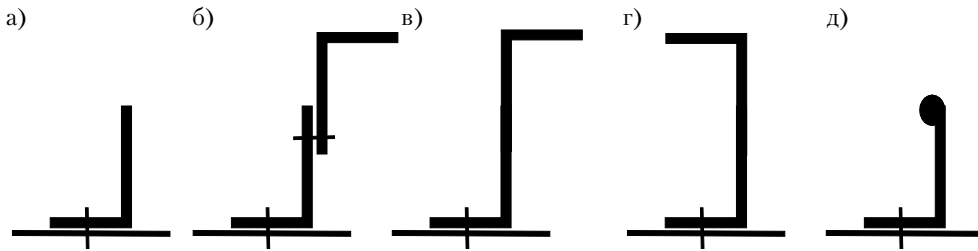


Рисунок 3. Шпангоуты железных судов.

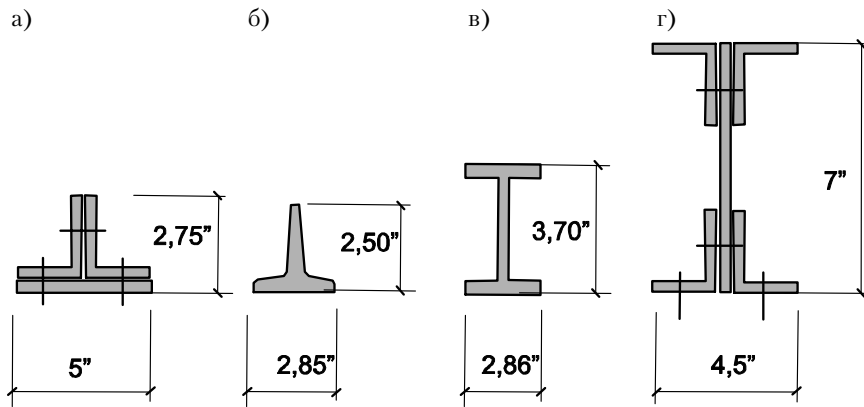


Рисунок 4. Конструкции, исследованные Фэрбэрном.

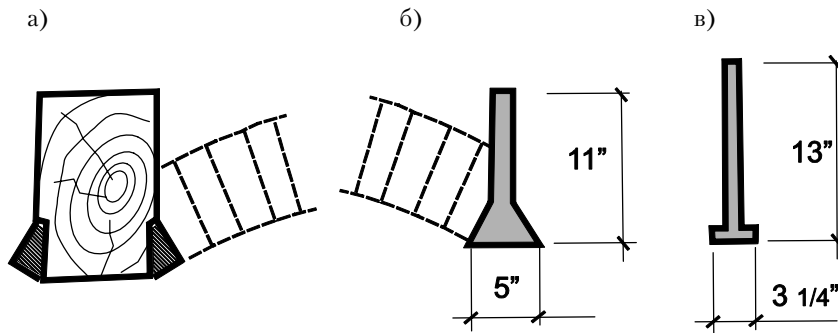


Рисунок 5. Устройство сводчатых кирпичных перекрытий.

Следующий шаг в развитии формы несущей балки был связан с использованием Т-образного сечения (рис. 5в). Это изменение произошло, когда Джеймс Уатт построил Солфордский Завод в 1799–1801 гг. Эти конструкции не были разработаны в соответствии с теорией в современном смысле этого слова, скорее они развились на основе инженерной интуиции.

Хотя перевернутый тавр был формой никогда прежде не рассматриваемой, формула для

вычисления ее несущей способности была предложена британским инженером Чарльзом Бэге (Bage) уже 1803 году. Бэге использовал свою формулу, чтобы определить размеры балок для завода в Лидсе и позже проверил свою теорию полномасштабными экспериментами.

В 1845 году во время забастовки Парижских плотников Фердинанд Зоре (Zorès) высказал идею замены древесины двутавровыми балками из сварочного железа для использования в

перекрытиях. Однако возможно, что Зоре начал свою работу над этим проектом несколько ранее. Зоре разрабатывал свой проект в то же самое время, что и парижский строительный подрядчик г. Чибо (Chibon). Идея Чибо состояла в том, чтобы взять пару тавров, уже доступных тогда как стандартные компоненты, добавить полосу листового железа и склепать все это в двутавровую балку. Очевидно, оба автора не были убеждены в практических преимуществах этого проекта, поскольку они решили вместо этого остановиться на компактном профиле сварочного железа, который нужно будет катать, что сделало бы клепку излишней.

Развитие соответствующей техники прокатки заняло, однако, несколько лет, и только к 1849 году металлопрокатные заводы смогли поставлять двутавровые балки без серьезных дефектов. В своей книге, изданной в 1853 году [16], Зоре рассказывает историю событий, которые привели к изобретению катаного двутавра из сварочного железа. Когда к концу 1848 Зоре добавил к катаному тавру второй пояс, заводы отказались прокатывать этот профиль,

пока не был размещен достаточно большой заказ, способный покрыть высокую стоимость нового оборудования. К тому времени, когда такой заказ (с помощью Зоре) был обеспечен, бельгийский изобретатель Альфонс Хальбо (Halbou) запатентовал новый метод производства фасонных профилей, основанный на прокатке стальной заготовки.

Зоре обеспечил заказ; он получил серебряную медаль на французской Национальной выставке 1849 года за внедрение двутавровых и швеллерных балок. Они скоро стали весьма успешными, по крайней мере в Париже, где широко вошли в строительную практику. Здесь использовалась, так называемая, Парижская клетка (рис. 6), где вместо ранее использовавшихся деревянных брусьев были применены прокатные двутавры.

Двутавры Зоре улучшили эту конструкцию, делая ее пригодной для междуэтажных перекрытий большого пролета и под большую нагрузку. Максимальный пролет, который было возможно перекрыть такой конструкцией, составлял приблизительно восемь метров.

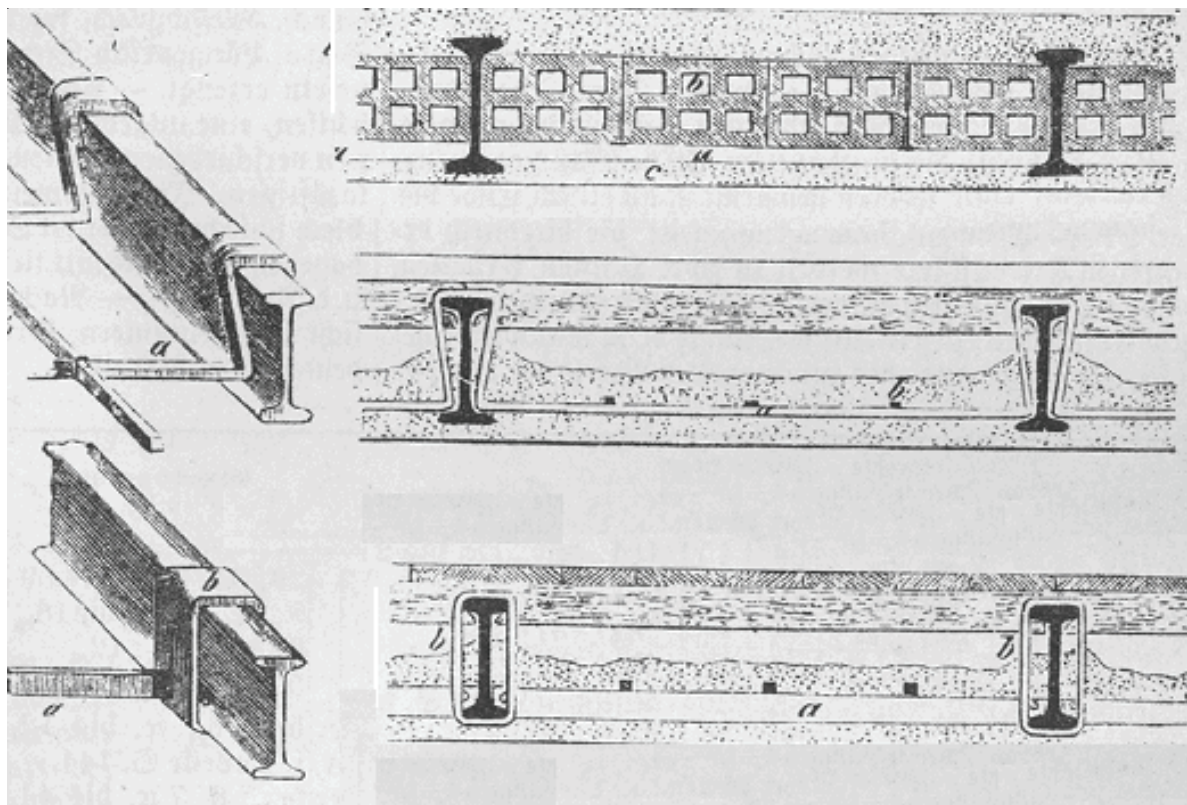


Рисунок 6. Парижская клетка.

Изобретение Фердинанда Зоре балки из сварочного железа, состоящей из одного двутавра, оказало решающее влияние на конструкцию перекрытий и в этом отношении должно быть признанным как своего рода поворотный момент, хотя у этого предложения фактически было несколько предшественников.

Использование металлических конструкций для устройства перекрытий (в основном чугунных стропильных систем) характерно и для России начала XIX века. Однако началось и применение железа, так в Санкт-Петербурге в 1838 году клепаная балка была использована для ремонта Зимнего Дворца после пожара 1837 года (рис. 7), но широкого распространения этот опыт не нашел.

Первое применение прокатных двутавровых балок в стальном несущем каркасе гражданского здания строительной конструкции зарегистрировано в 1884 году в США десятиэтажного «небоскрёба». Сегодня для нас это рутинно, но в конце XIX века инновационная для того времени технология стала настоящим революционным прорывом в сфере капитального строительства. Именно то 10-этажное здание стало прообразом множества известных на весь мир высотных построек. А стальная двутавровая балка превратилась в неотъемлемый элемент не только любого небоскрёба, но и практически любого несущего каркаса.

### 3. Исследователи

Приблизительно в 1820 году во Франции Альфонс Дюло (Duleau), дипломированный специалист из Ecole Polytechnique, проводил испытания на изгиб прямоугольных балок [8]. Тогда же он испытал серию составных балок из двух плоских параллельных стержней, соединенных распорными деталями (рис. 8). Дюло нашел, что несущая способность такой балки увеличилась с увеличением расстояния между стержнями и предложил использовать эти стержни как полки, соединяя их вертикальной стенкой. По-видимому, это было первое испытание конструкции из сварочного железа отличной от прямоугольного бруса.

К сожалению, это открытие оставалось лишь в пределах границ французской испытательной лаборатории, и находка Дюло переоткрывалась в кропотливых исследованиях других ученых. Идеи Дюло не были осознаны в течение еще практически 25 лет, пока исследования Фэрбэрна не открыли путь к строительству трубчатых мостов из сварочного железа.

Двутавровый брус практически был исследован в чугуне. В развитии этой конструктивной формы теоретическая работа предшествовала практическому применению; на основе теории брус был задуман сначала с равными полками, затем он был изменен, чтобы удовлетворить особенностям использованного материала.

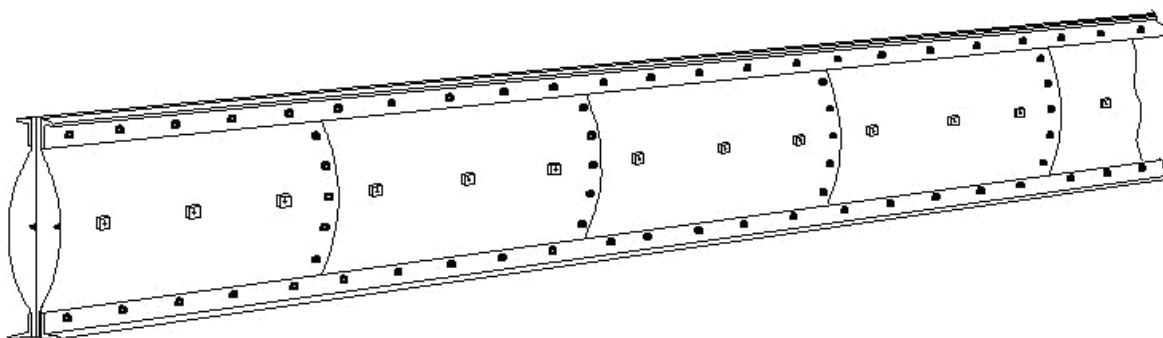


Рисунок 7. Трубчато-двутавровая балка из Зимнего Дворца.

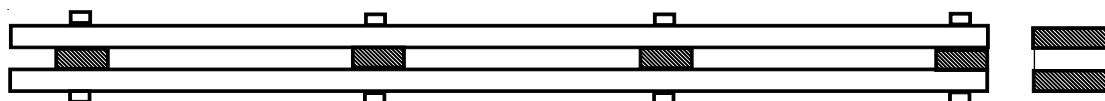


Рисунок 8. Составной стержень.

К 1824 году авторитетным специалистом по сопротивлению материалов был Томас Тредгольд (Tredgold) британский инженер и автор учебника [15]. В своей книге Тредгольд описал доводы, которые привели его к симметрическому двутавровому профилю как самой грузоподъемной форме поперечного сечения. Он предложил распределить большую часть его материала в максимально возможной степени далеко от нейтральной оси (сегодня мы бы сказали, что следует стремиться к идеальному двутавру). После этих исследований Тредгольд продолжил строить такой брус из чугуна. Стенка и две равные полки этого бруса были одинаковой толщины, поскольку эта форма особенно подходила для поведения охлажденного металла.

К сожалению, Тредгольд проводил очень узкие испытания, при которых измерялись только прогибы центра под собственным весом балки. Таким образом, он стоял на самом пороге открытия новой и эффективной конструктивной формы, но его отказ от проведения полного цикла экспериментов не дал убедительных доводов практикующим инженерам.

Фэрбэрн полагал, что эксперименты Тредгольда были, вероятно, выполнены 2 или 3 года до публикации второго выпуска книги Тредгольда в 1824, т. е. приблизительно в 1821 или 1822 году. Однако Фэрбэрн чувствовал, что его собственная работа в 1824 году была, вероятно, первым серьезным усилием улучшить пропорции чугунных балок, и последующей работой Фэрбэрна и Уатта было начато исследование относительно роли отдельных полок двутавра.

Тредгольд исследовал случай равных полок, и проблема должна была ждать решения еще почти 10 лет, пока Итон Ходкинсон (Hodgkinson), британский математик и исследователь сопротивления материалов, определил правильные пропорции для чугунных балок.

Классические эксперименты Ходкинсона были начаты в 1827 году исходя из нового и непредубежденного подхода, когда было решено искать ответ на вопрос: могла ли бы та же несущая способность быть получена с меньшим количеством металла путем совершенствования формы поперечного сечения [12]. Испытания состояли в доведении балки до разрушения поперечной нагрузкой, и Ходкинсон начал с

двутаврового профиля Тредгольда с равными полками (рис. 9а), а затем он увеличивал размер разрушавшегося растянутого пояса до тех пор, пока испытываемый образец не стал ломаться от сжатия в верхнем поясе. Он тогда установил «идеальное» сечение чугунной балки, когда отношение площадей сжатого и растянутого пояса равно один к шести (рис. 9б).

Пропорции для чугунной балки были определены в 1827 году Ходкинсоном, но приемлимых результатов для использования сварочного железа нужно было ждать, пока Фэрбэрн в 1845 году не выполнил его известные эксперименты, связанные со строительством трубчатых мостов «Британия» и «Конвей» [9]. Проектировал эти мосты Роберт Стефенсон, сын основоположника железных дорог Георга Стефенсона. Стефенсон привлек Фэрбэрна к экспериментальному обоснованию конструктивных решений, а своего друга Ходкинсона – к расчетам мостов.

Фэрбэрн начал свои испытания с балок скругленной формы, первоначально предложенных Стефенсоном. Исследования начались с представления, что сварочное железо было только менее хрупкой формой чугуна, и первоначальные вычисления были основаны на формуле Ходкинсона для чугунных балок. Но испытания показали, что сварочное железо вело себя по-другому, чем чугун; и главной особенностью разрушения оказалось сжатие.

Дальнейшие испытания доказали, что это не было свойством материала, а было связано с выпучиванием металлических листов, явление, не обнаруженное в балках из чугуна из-за их толстостенности. Используя свой опыт в судостроении в применении к мостам, Фэрбэрн продолжил конструкцию коробчатой балки (прямоугольной трубы) и впоследствии эта

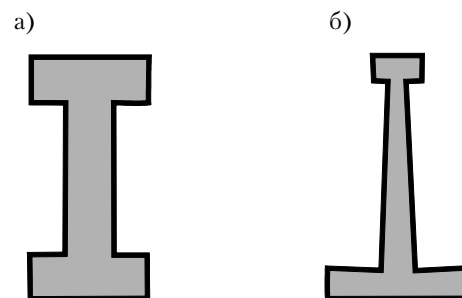


Рисунок 9. Поперечные сечения чугунных балок.



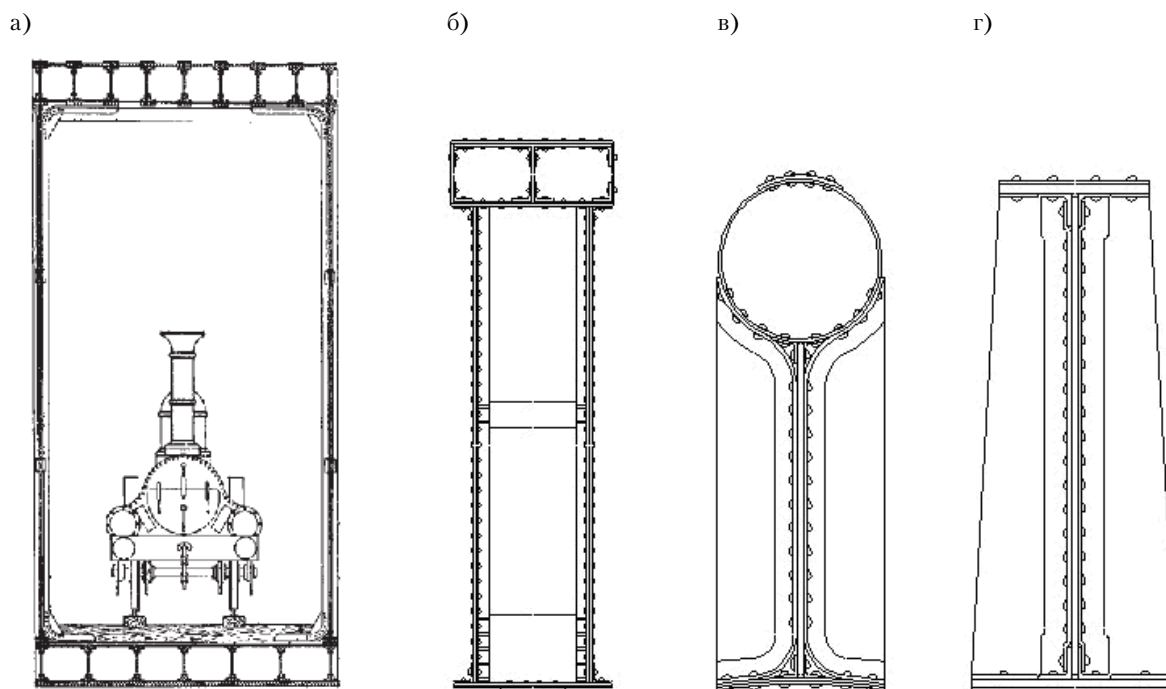


Рисунок 10. Трансформация коробчатого сечения моста.

форма была принята для мостов «Британия» и «Конвей».

Независимо от того, как развивалось исследование, оно привело к прекрасной форме прямоугольной трубы с коробчатыми поясами (рис. 10а). Трубчатая форма сжатого пояса упрощалась (рис. 10б–10г), этот переход занял около полдюжины лет, и приблизительно в 1850 году коробка окончательно уступила место двутавру, когда Изамбард Кингдом Брюнель (Brunel), еще один известный английский мостостроитель, сумел доказать значительные преимущества составных балок двутаврового сечения над трубчатыми. Одиночная вертикальная стенка двутавровой балки дает заметное сбережение материала сравнительно с двумя стенками трубчатой балки, при том она более защищена от порчи ржавчиной и легко доступна осмотру и окраске.

В заключение следует заметить, что основным методом исследований был эксперимент, а не теоретические построения. Английские инженеры в XIX столетии боялись математики. Лишь к концу века теоретический анализ конструктивной формы стал определяющим инструментом ее развития.

#### 4. Усовершенствования

Развитие строительства привело к увеличению размеров прокатных профилей и к появлению широкополочных двутавров, способных заменить сложные составные сечения из уголков и листов, соединенных заклепками. В 1902 г. в Люксембурге на основе изобретения американского инженера Генри Грея (Grey), запатентованного в 1897 году способ прокатки двумя парами валков (одна пара обжимает стенку, другая – полки), был построен первый стан для прокатки широкополочных двутавров [7]. На нем были успешно прокатаны двутавры высотой до 1 000 мм при ширине полок до 300 мм. Первые широкополочные двутавры имели уклон внутренних граней полок. В 1914 г. немецкая фирма «Пайне» впервые в мировой практике начала прокатывать широкополочные двутавры с параллельными гранями полок [5] на основе усовершенствования, запатентованного Пуппе в 1911 году (рис. 11).

Высокая эффективность способа прокатки двутавров с широкими полками и параллельными гранями способствовала весьма быстрому его распространению. Производство экономичных двутавров с широкими и параллельными

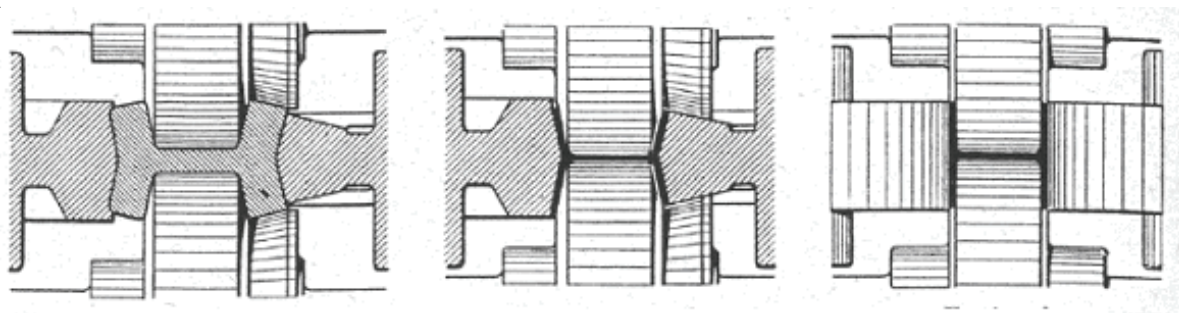


Рисунок 11. Формирование двутавра на четырехвалковом стане.

полками получило особенно большое развитие в 1955–1967 гг. К концу этого периода оно составило около 75 % общего производства двутавров в Европейских странах и достигло в 1970 г. 80 % общего производства двутавров в США.

С начала XX века начали исследоваться сварные двутавры, которые сперва изготавливались с использованием ацетиленокислородной сварки. Это случилось после того, как в 1903 году французские инженеры Эдмон Фуше и Шарль Пикар сконструировали первую ацетиленокислородную сварочную горелку и получили на нее патент Германии.

Электросварка первоначально появилась в виде сварки дугой с использованием неплавящегося угольного электрода (предложение Августа де Меритана – 1881 год и Н. И. Бенардоса – 1882 год). Спустя короткое время, в 1888 году, Н. Г. Славянов заменил уголь на голый металлический электрод, но основной прогресс был достигнут приблизительно в 1902 году, когда Оскар Кельберг изготовил флюс для голых электродов.

С внедрением в технику дуговой сварки толстопокрытых электродов (1912 год) появились новые способы дуговой сварки, после чего газовая сварка постепенно начала вытесняться электрической сваркой. Тогда же появились первые сварные двутавры из трех листов, сперва в кораблестроении, затем и в строительстве.

Наряду с производством прокатных двутавров примерно с 20-х годов XX века разрабатывались различные усовершенствованные способы изготовления сварных профилей, но в связи с пуском высокопроизводительных универсальных балочных станков производство сварных двутавров общего назначения не получило очень широкого распространения.

Основную массу двутавровых профилей в технически развитых странах производят методом горячей прокатки. Наряду с этим применяются усовершенствованные способы производства сварных двутавров в тех случаях, когда получение их методом горячей прокатки практически исключено, а именно: особо тонкостенные балки, профили резко асимметричного сечения, бистальные двутавры, двутавры высотой более 1 000 мм и т. п.

## 5. Дальнейшие шаги

Дальнейшее развитие конструктивной формы двутавра существенно связано с использованием сварки. Так, например, перспективными являются сечения в виде двутавра, в качестве полок которого используют прокатные тавры и холодногнутые профили.

Снижение металлоемкости может быть достигнуто за счет использования в одной конструкции двух различных марок сталей (бистальные балки). В них целесообразно наиболее напряженные участки поясов выполнять из стали повышенной прочности, а стенку и малонапряженные участки поясов – из малоуглеродистой стали.

Балки с очень тонкой гибкой стенкой появились впервые в конструкциях каркасов летательных аппаратов, где для легкости стенки выполняли зачастую не из металла, а из прочной ткани (перкаль, брезент). Плоская стенка в такой балке теряет устойчивость в начальной стадии нагружения, приобретая вторую устойчивую форму – в виде наклонно гофрированной поверхности. После снятия нагрузки эти деформации стенок, называемые часто «хлопунами», исчезают. Они являются дальнейшим воплощением идеи о тесной связи показателей

экономической эффективности с понятием тонкостенности.

Стремление повысить эффективность использования металла в работе изгибаемых элементов привело инженеров еще в начале XX в. к оригинальной идее перфорированных балок, позволяющей расширить диапазон использования стального проката. Стенка прокатного двутавра разрезается по зигзагообразной ломаной линии с регулярным шагом с помощью газовой резки или на мощных прессах, и затем обе половины разрезанной балки соединяются сваркой в совмещенных между собой выступах стенки. Конечный результат приводит к увеличению высоты балки и позволяет перераспределить материал сечения, концентрируя его ближе к периферийным волокнам (полкам) и существенно повышая такие геометрические характеристики сечения.

Конструктивные решения балок с перфорированной стенкой отличаются большим разнообразием, определяемым способом разрезки стенки (рис. 12). Наметив осевую линию разрезки наклонно к полкам после разрезки и разворота одной из половин балки относительно ее центральной вертикальной оси, получают в результате соединения обеих половин балку переменной высоты. Стремление повысить сечение при умеренном ослаблении поясных тавров и простенков привело к использованию пластинчатых вставок между гребнями соединяемых частей. Это решение может также оказаться высокоэффективным при значительных пролетах и относительно небольшой нагрузке, особенно в тех случаях, когда требуется повышенная изгибная жесткость по условию предельного прогиба.

К одному из первых известных применений перфорированных конструкций относится мост в г. Чикаго (США), построенный в 1910 году. В СССР в конце 30-х и начале 40-х гг. идея использования балок с перфорированной стенкой в строительных конструкциях была предложена и разрабатывалась Ленинградским проектным бюро Проектстальконструкция.

Одним из путей снижения металлоемкости балок является гофрирование их стенок. В обычных балках толщина стенок, как правило, определяется не условием прочности, а требованиями местной устойчивости. Постановка поперечных ребер смягчает ситуацию, позволяя уменьшить толщину стенок и одновременно повышая крутильную жесткость балок, так как ребра играют роль диафрагм и обеспечивают неизменяемость контура поперечного сечения. Еще в середине тридцатых годов XX в. появилась идея гофрирования стенок балок, которое еще более эффективно обеспечит желаемые результаты. Гибкость таких стенок можно повысить до 300..600, к тому же чем тоньше стенка, тем легче выполнить ее гофрирование.

С 60-х годов прошлого столетия экспериментальные и теоретические исследования гофрированных балок ведутся во всем мире. Этими работами доказана эффективность такой конструкции.

\* \* \*

Итак, кто же в конце концов придумал двутавр? Выше было показано, что одного изобретателя здесь не укажешь. История становления и развития этой конструктивной формы номер один не имеет четкого начала, а возможности ее развития и совершенствования не дают право говорить о конце этой увлекательной истории.

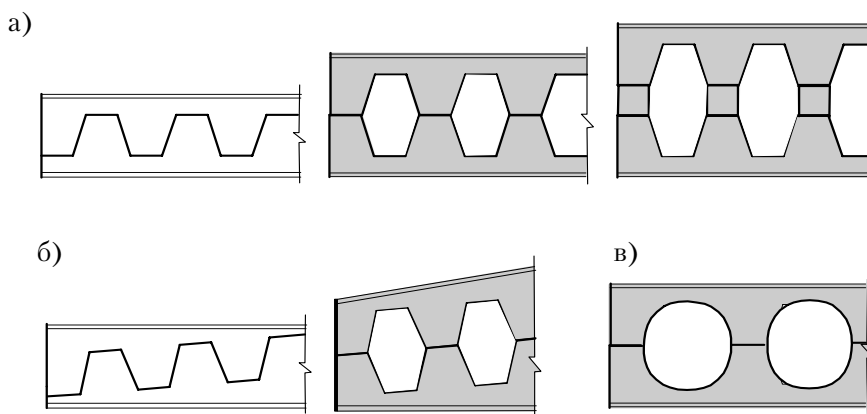


Рисунок 12. Балки с перфорированной стенкой.

## Литература

1. Балдин, В. А. Балки из двух марок сталей [Текст] / В. А. Балдин, Е. Е. Кочергова // Промышленное строительство. – 1964. – № 11. – С. 20–23.
2. Вахуркин, В. М. Наивыгоднейшая форма двутавровых балок [Текст] / В. М. Вахуркин // Бюллетень строительной техники. – 1949. – № 21. – С. 3–8.
3. Вахуркин, В. М. Форма двутавровой балки в условиях наименьшего расхода металла и наименьшей стоимости [Текст] / В. М. Вахуркин // Вестник инженеров и техников. – 1951. – № 5. – С. 213–218.
4. Горбунов, Б. Н. Сплошные сварные балки и мосты [Текст] / Б. Н. Горбунов. – М.-Л.: Стройиздат, 1941. – 138 с.
5. Михайлов, Б. П. Итоги разработки прокатных профилей для металлических конструкций [Текст] / Б. П. Михайлов. – М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1935. – 83 с.
6. Тимошенко, С. П. История науки о сопротивлении материалов [Текст] / С. П. Тимошенко. – М.: Гостехтеорииздат, 1957. – 537 с.
7. Cord, E. Die technische Entwicklung des Peiner Walzwerks 1872–1950 [Текст] / E. Cord. – Dusseldorf: Stahleisen, 1952. – 115 s.
8. Duleau, A. Essai théorique et expérimental sur la résistance du fer forgé [Текст] / A. Duleau. – Paris, 1820.
9. Fairbairn, W. An Account of the Construction of the Britannia and Conway Tubular Bridges with a complete History of their Progress, from the Conception of the Original Idea, to the Conclusion of the Elaborate Experiments which Determined the Exact Form and Mode of Construction ultimately [Текст] / W. Fairbairn. – London: John Weale and Longman, Brown, Green & Longmans, Paternoster Row, 1849. – 291 p.
10. Fairbairn, W. An Experimental Inquiry into the Strength of Wrought-Iron Plates and Their Riveted Joints as Applied to Ship-building and Vessels Exposed to Severe Strains [Текст] / W. Fairbairn // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1850. – Vol. CXL, Part I. – P. 677–725.
11. Fairbairn, W. Treatise on Iron Ship Building: Its History and Progress [Текст] / W. Fairbairn. – London: Longman, 1865. – 313 p.
12. Hodgkinson, E. Theoretical and experimental researches to ascertain the strength and best forms of iron beams [Текст] / E. Hodgkinson // Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester. – 1831. – S. 2–5. – P. 407–544.
13. Jewett, R. Structural Antecedents of the I-Beam, 1800–1850 [Текст] / R. Jewett // Technology and Culture. – 1967. – Vol. VIII, № 3. – P. 346–362.
14. Mende, M. The Crucial Impact of Improvements in Both Steelmaking and Rolling on 19th and Early 20th-Century Building Construction [Текст] / M. Mende // Proceedings of the Second International Congress on Construction History [Volume 2] / Herausgegeben von: Malcolm Dunkeld,

## References

1. Baldin, V. A.; Kochergova, E. E. Beam from two steel types. In *Industrial engineering*, 1964, No. 11, p. 20–23. (in Russian)
2. Vahurkin, V. M. Optimal model of I-beams. In *Report of building technology*, 1949, No. 21, p. 3–8. (in Russian)
3. Vahurkin, V. M. I-beam model under the conditions of minimal amount use of metal and least cost. In *Vestnik of Engineers and Mechanics*, 1951, No. 5, p. 213–218. (in Russian)
4. Gorbunov, B. N. Bund welded beams and bridges. Moscow-Leningrad: Stroizdat, 1941. 138 p. (in Russian)
5. Mihailov, B. P. Results of rolling sections development for metal construction. Moscow-Leningrad: Main office of building literature, 1935. 83 p. (in Russian)
6. Timoshenko, S. P. Scientific history about structural resistance. Moscow: Gosttehteorizdat, 1957. 537 p. (in Russian)
7. Cord, E. Die technische Entwicklung des Peiner Walzwerks 1872–1950. Dusseldorf: Stahleisen, 1952. 115 s.
8. Duleau, A. Essai théorique et expérimental sur la résistance du fer forgé. Paris, 1820.
9. Fairbairn, W. An Account of the Construction of the Britannia and Conway Tubular Bridges with a complete History of their Progress, from the Conception of the Original Idea, to the Conclusion of the Elaborate Experiments which Determined the Exact Form and Mode of Construction ultimately. London: John Weale and Longman, Brown, Green & Longmans, Paternoster Row, 1849. 291 p.
10. Fairbairn, W. An Experimental Inquiry into the Strength of Wrought-Iron Plates and Their Riveted Joints as Applied to Ship-building and Vessels Exposed to Severe Strains. In *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1850, Vol. CXL, Part I, p. 677–725.
11. Fairbairn, W. Treatise on Iron Ship Building: Its History and Progress. London: Longman, 1865. 313 p.
12. Hodgkinson, E. Theoretical and experimental researches to ascertain the strength and best forms of iron beams. In *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester*, 1831, S. 2–5, p. 407–544.
13. Jewett, R. Structural Antecedents of the I-Beam, 1800–1850. In: *Technology and Culture*, 1967, Vol. VIII, No. 3. – P. 346–362.
14. Mende, M. The Crucial Impact of Improvements in Both Steelmaking and Rolling on 19th and Early 20th-Century Building Construction. In *Proceedings of the Second International Congress on Construction History [Volume 2]*. Cambridge: Short Run Press, 2006, p. 2159–2170.
15. Tredgold, Thomas; Hodgkinson, Eaton. Practical Essay on the Strength of Cast Iron and Other Metals (4th ed., with notes by Eaton Hodgkinson). London: John Weale, 1842. 504 p.

- James W. P. Campbell, Hentie Louw [et al.]. – Cambridge : Short Run Press, 2006. – P. 2159–2170.
15. Tredgold, Thomas. Practical Essay on the Strength of Cast Iron and Other Metals [Текст] / Thomas Tredgold, Eaton Hodgkinson. – (4th ed., with notes by Eaton Hodgkinson). – London : John Weale, 1842. – 504 p.
16. Zores, Ch.F. Recueil des Fers Speciaux des experiences faites sur leurs resistance et de leurs diverses applications dans les constructions [Текст] / Ch. F. Zores. – Paris, 1853.
16. Zores, Ch.F. Recueil des Fers Speciaux des experiences faites sur leurs resistance et de leurs diverses applications dans les constructions. – Paris, 1853.

**Перельмутер Анатолій Вікторович** – доктор технічних наук, професор; головний науковий співробітник НВО СКАД Софт, дійсний член Академії будівництва України, іноземний член Російської академії архітектури і будівельних наук, член Української Асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: нелінійні задачі будівельної механіки, надійність конструкцій і споруд, обґрунтування розрахункових моделей.

**Перельмутер Анатолій Вікторович** – доктор технических наук, профессор; главный научный сотрудник НПО СКАД Софт, действительный член Академии строительства Украины, иностранный член Российской академии архитектуры и строительных наук, член Украинской Ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: нелинейные задачи строительной механики, надежность конструкций и сооружений, обоснование расчетных моделей.

**Anatoly Perelmuter** – DcS (Eng.), Main Researcher of SCAD Soft Co. He is a member of the Civil Engineering Academies of Ukraine, Foreign member of the Russian Architecture and Building Academy, a member of the Ukrainian Association of Metal Structures. Scientific interests: non-linear problems on structural mechanics, reliability of structures and constructions, substantiation of settlement models.