

Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей

*К.т.н., доцент Д.В. Курлапов;
к.т.н., профессор В.М. Хомич;
адъюнкт А.В. Леванов*;*

Военный инженерно-технический институт (филиал)

ФГБОУ ВПО «Военная академия тыла и транспорта им. генерала армии Хрулева А.В.»

Ключевые слова: предел текучести строительной стали; метод; удельная энергия; устройство

Оценка технического состояния, а также изыскание резервов несущей способности сохраняемых стальных конструкций позволяет экономить определенную долю средств, выделяемых на реконструкцию и усиление объектов капитального строительства. Несущая способность стальных конструкций определяется несущей способностью элементов и несущей способностью узлов, соединений и сопряжений. Несущая способность элементов в основном определяется прочностными свойствами стали и геометрическими характеристиками сечения.

В настоящей работе рассматриваются вопросы определения прочностных свойств стали конструктивных элементов, а именно предела текучести и временного сопротивления (далее по тексту механические свойства) существующих стальных конструкций.

Основной характеристикой сопротивления материала силовым воздействиям является нормативное сопротивление R_n . Нормативные сопротивления устанавливаются на основе статистической обработки данных по испытаниям образцов. Для металлических конструкций приняты два вида нормативных сопротивлений: R_{yn} , устанавливаемое по пределу текучести σ_y , и R_{un} , устанавливаемое по временному сопротивлению σ_u .

Нормируемые в руководящих документах значения предела текучести σ_y и временного сопротивления σ_u являются браковочными минимумами этих величин. При этом отбор образцов осуществляется так, чтобы обеспеченность браковочного минимума была не менее 0,95 (ГОСТ 27772-88*). Например, для предела текучести стали ВСтЗпс6, гистограмма распределения и плотность вероятности которого приведены на рис. 1, браковочный минимум установлен $\sigma_y=235$ МПа в соответствии с требованиями СНиП II-23-81*.

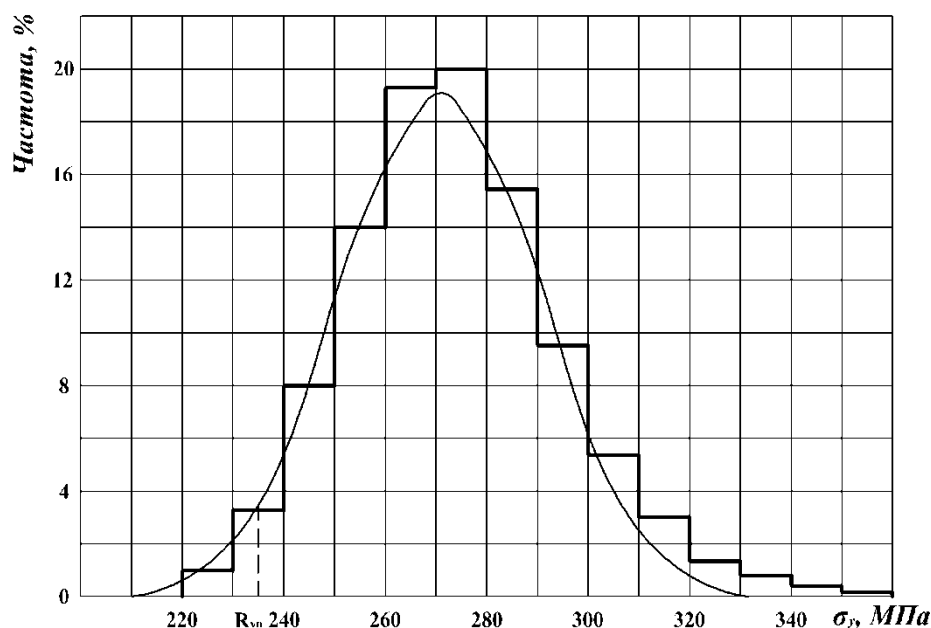


Рисунок 1. Гистограмма распределения и плотность вероятности предела текучести стали ВСтЗпс6

Площадь под кривой плотности вероятности справа от абсциссы $\sigma_y=235$ МПа равна 0,95. Анализируя гистограмму, представленную на рис. 1, можно сделать вывод, что конструктивные элементы существующих стальных конструкций обладают запасом прочности, учесть влияние которого при расчете этих конструкций не представлялось возможным [1-6]. Превышение фактических значений механических свойств материала элементов в эксплуатируемых стальных конструкциях над их расчетными характеристиками составляет, по разным источникам, 10-20%.

Методика определения механических свойств стали для элементов в существующих стальных конструкциях предусматривает испытания вырезанных образцов, изготовленных в соответствии с требованиями руководящих документов (ГОСТ 1497-84) путем их статического растяжения на разрывной машине. Механические свойства материала, полученные с помощью статического растяжения образцов, довольно точны, их достоверность обычно не ниже 0,95.

Однако следует заметить, что:

- процесс изготовления образцов весьма трудоемок;
- для некоторых элементов вырезание образцов невозможно или связано с определенными затруднениями, например в элементах, определяющих несущую способность конструкции в целом;
- ослабленное место элемента при вырезании образца может требовать усиления накладками или другим способом;
- для испытания образцов требуются специальные разрывные машины и другие приборы, которые не всегда доступны, особенно в отдаленных районах.

В связи с перечисленными недостатками интерес представляют косвенные способы определения механических свойств материала элементов в существующих стальных конструкциях, которые позволяли бы проводить измерения в необходимом объеме без непосредственного вырезания образцов.

Таких способов, позволяющих достаточно точно определять механические свойства стали, довольно много, однако все они имеют определенные недостатки, подробно рассмотренные в [7].

В данной работе предлагается к рассмотрению метод определения фактических значений механических свойств стали в существующих конструкциях.

Предлагаемый метод основан на сравнении значений удельных энергий, затраченных на сверление каналов в эталонном образце и в элементе обследуемой стальной конструкции.

Для реализации предложенного метода необходимо иметь образец, изготовленный из строительной стали в соответствии с требованиями руководящих документов, с известными механическими свойствами, назовем его эталонным. Значения механических свойств стали эталона получают путем статического растяжения данного образца с помощью разрывной машины. При этом считается, что диаграммы напряжений при растяжении стали исследуемого конструктивного элемента и стали эталонного образца подобны по внешнему виду, что было установлено из анализа большого числа справочных материалов [8]. Площадь под кривой диаграммы растяжения является интегральным показателем и соответствует работе A , затрачиваемой на разрушение данного эталонного образца. Проанализировав диаграммы растяжения образцов, изготовленных из всех классов строительных сталей, представленных в нормативных документах, можно сделать вывод, что все стали проходят похожие стадии деформирования при статическом растяжении образцов с помощью разрывной машины, и что протяженность диаграммы растяжения по оси абсцисс для строительных сталей, близких по своему классу, будет примерно одинакова.

И в эталонном образце, и в исследуемом материале стальной конструкции выполняют серии сверлений, при этом считается, что предел текучести σ_y и временное сопротивление σ_u материала эталонного образца и материала исследуемого конструктивного элемента соотносятся так же, как значения удельных энергий, затраченные при сверлении в них каналов:

$$\frac{\sigma_{fact}}{\sigma_1} = \frac{W_{ufact}}{W_{u1}},$$

где σ_{fact} – предел текучести (временное сопротивление) материала исследуемого элемента стальной конструкции;

σ_1 – предел текучести (временное сопротивление) материала эталонного образца;

W_{ufact} – математическое ожидание для значений удельных энергий, затраченных при сверлении материала исследуемого элемента стальной конструкции;

W_{u1} – математическое ожидание для значений удельных энергий, затраченных при сверлении материала эталонного образца.

Соответственно, предел текучести либо временное сопротивление (в зависимости от интересующего параметра) материала исследуемых конструктивных элементов определяют по формуле:

$$\sigma_{fact} = \sigma_1 \frac{W_{ufact}}{W_{u1}}. \quad (1)$$

Сверление каналов в элементах существующих стальных конструкций сверлом малого диаметра не приведет к существенному снижению их несущей способности и позволит проводить измерения в необходимом объеме непосредственно на строительной площадке, а не в лабораторных условиях, что позволит сократить время и стоимость проводимых исследований, поэтому применение предлагаемого метода представляет практический интерес. Для получения более достоверных сведений сверление необходимо проводить в малонапряженных зонах обследуемых конструктивных элементов.

Для проверки разработанного метода были проведены экспериментальные исследования с использованием образцов, изготовленных из строительных сталей.

При проведении исследований использовали образцы толщиной 16 мм, изготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 из сталей, часто применяемых в строительстве, а именно малоуглеродистой стали (марки ВСтЗпсб) и низколегированной стали (марки 15ХСНД).

Для удобства проведения испытаний образцы разбиты на две серии: первая серия – образцы, изготовленные из стали марки ВСтЗпсб; вторая серия – образцы, изготовленные из стали марки 15ХСНД.

Количество образцов для испытаний в одной серии определялось согласно работам [9,10] по формуле (1):

$$N = \left[\left(\frac{va}{p_t} \right)^2 \right] + 1, \quad (2)$$

где N – количество образцов в серии, необходимое для обеспечения заданной достоверности измерения механических свойств стали;

[] означает действие «выделение целой части»;

p_t – показатель точности измерений; так как испытания образцов будут проводиться в соответствии с методикой, регламентированной ГОСТ 1497-84*, показатель точности был принят равным 5%;

a – показатель достоверности измерений (при вероятности 0,95, $a=1,96$ [11]);

v – коэффициент вариации; так как коэффициент вариации можно найти только после проведения испытаний, при планировании эксперимента можно задаться этим коэффициентом, для металла $v = 3-5\%$, отсюда коэффициент вариации был принят равным 5%.

При статическом растяжении исследуемых образцов определены предел текучести и временное сопротивление сталей, из которых изготовлены образцы (табл. 1).

Таблица 1. Механические свойства сталей, из которых изготовлены исследуемые образцы

№ Образца	ВСтЗпсб		15ХСНД	
	σ_y , МПа	σ_u , МПа	σ_y , МПа	σ_u , МПа
1	297	405	392	542
2	294	394	386	529
3	304	397	395	518
4	308	402	388	533

Используя результаты измерений, представленные в табл. 1, были вычислены математические ожидания для механических свойств исследуемых сталей:

Курлапов Д.В., Хомич В.М., Леванов А.В. Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей

$$M = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C B_c,$$

где B_c – вариация – величина, получаемая в результате каждого измерения;
 C – число измерений,
 и средние квадратические отклонения для механических свойств исследуемых сталей:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{C-1} \sum_{c=1}^C x_c^2},$$

где x_i – величина, характеризующая отклонение результата каждого измерения предела текучести (временного сопротивления) стали от среднего арифметического значения ($x_c = B_c - M$).

Значения математических ожиданий и средних квадратических отклонений для механических свойств сталей, из которых изготовлены исследуемые образцы, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Математические ожидания, средние квадратические отклонения и вариационные коэффициенты для механических свойств исследуемых сталей

Марка стали	Значения			
	$M\sigma_y$, МПа	$M\sigma_u$, МПа	$\sigma\sigma_y$, МПа	$\sigma\sigma_u$, МПа
ВСтЗпс6	301	399	6,3	4,6
15ХСНД	390	531	4,3	9,6

Здесь $M\sigma_y(\sigma_u)$ – математическое ожидание для предела текучести (временного сопротивления) исследуемых сталей;

$\sigma\sigma_y(\sigma_u)$ – среднее квадратическое отклонение для предела текучести (временного сопротивления) исследуемых сталей, полученные при статическом (кратковременном) растяжении стальных образцов на разрывной машине.

На основе математических ожиданий и среднеквадратических отклонений были определены доверительные интервалы для механических свойств исследуемых сталей при заданной достоверности измерения 0,95.

Так как количество образцов в серии мало ($N < 30$), доверительные интервалы для механических свойств сталей, из которых изготовлены исследуемые образцы, согласно работе [11] определялись по формуле:

$$M - t_\gamma \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}} < M < M + t_\gamma \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}.$$

При $N=4$ и $\gamma=0,95$, используя распределение Стьюдента, имеем $t_\gamma=2,78$ [11]. Доверительные интервалы для механических свойств исследуемых сталей сведены в табл. 3.

Таблица 3. Доверительные интервалы для механических свойств исследуемых сталей при заданной достоверности измерения 0,95

Механические свойства стали	Доверительные интервалы, МПа	
	ВСтЗпс6	15ХСНД
Предел текучести	293 < M < 309	384 < M < 396
Временное сопротивление	392 < M < 406	518 < M < 544

После построения доверительных интервалов для механических свойств исследуемых сталей необходимо проверить, попали ли полученные значения предела текучести и временного сопротивления сталей, представленные в табл. 1, в заданные границы соответствующих доверительных интервалов.

В данном случае все значения предела текучести и временного сопротивления исследуемых сталей оказались в заданных границах соответствующих доверительных интервалов, следовательно, достоверность измерения 0,95 механических свойств исследуемых сталей была обеспечена.

Курлапов Д.В., Хомич В.М., Леванов А.В. Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей

Для проведения экспериментальных исследований, касающихся проверки положений разработанного метода, было собрано устройство, схема которого представлена на рис. 2:

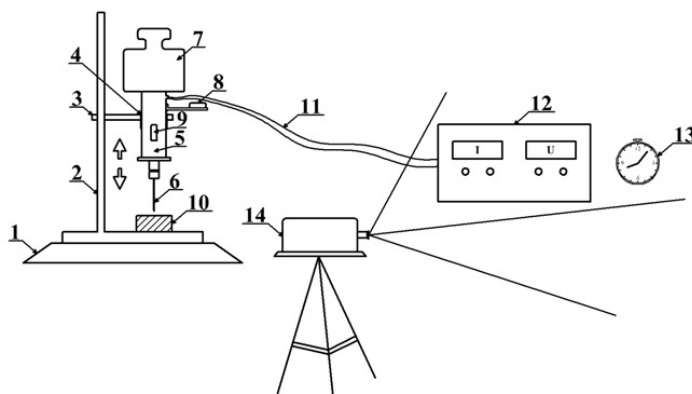


Рисунок 2. Устройство для реализации предложенного метода:

1 – стальная подставка под штатив; 2 – штатив; 3 – горизонтальная направляющая; 4 – раздвижное кольцо; 5 – электродвигатель постоянного тока; 6 – сверло малого диаметра; 7 – груз; 8 – горизонтальный уровень; 9 – вертикальный уровень; 10 – исследуемый образец; 11 – провода; 12 – блок питания постоянного тока; 13 – секундомер; 14 – видеокамера

В результате испытаний рассматриваемых серий образцов при помощи разрывной машины МР-50 были определены предел текучести и временное сопротивление для каждой из исследуемых сталей (табл. 1).

В каждом «разорванном» образце при помощи устройства, изображенного на рис. 2, сверлом малого диаметра при постоянном усилии прижима сверла к исследуемому материалу было выполнено по десять сверлений. Временные промежутки при каждом сверлении были равны 80 сек, их засекали при помощи секундомера, расстояние между просверленными каналами сверления составляло 1,5 см.

В результате проведения экспериментальных исследований были определены удельные энергии, затраченные при сверлении каждого канала в исследуемых образцах. Методика определения данных значений удельных энергий подробно изложена в [12].

Для описания предложенного метода в данной работе определен предел текучести стали ВСтЗпсб. Для этого в качестве эталона использовали первый образец второй серии, изготовленный из стали 15ХСНД, а в качестве исследуемого первый образец первой серии, изготовленный из стали ВСтЗпсб.

При проведении экспериментальных исследований по определению предела текучести исследуемой стали при каждом сверлении в эталонном и исследуемом образцах использовали новое сверло. Полученные значения предела текучести стали ВСтЗпсб при каждом сверлении, вычисленные по формуле (1), представлены в табл. 4:

Таблица 4. Значения предела текучести стали ВСтЗпсб при каждом сверлении

Номер сверления									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение предела текучести стали ВСтЗпсб, МПа									
272	291	285	368	271	284	293	292	293	287

После определения предела текучести исследуемой стали при каждом сверлении были определены математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение для предела текучести стали при десяти сверлениях, а также оценена пригодность полученного значения предела текучести стали для использования на практике.

С этой целью для предложенного метода при десяти сверлениях был определен доверительный интервал для предела текучести стали ВСтЗпсб при заданной достоверности измерения 0,95:

$$274 < M < 312 \text{ МПа.}$$

На рис. 3 графически представлены доверительные интервалы для предела текучести стали ВСтЗпсб, полученные для разработанного метода (нижний доверительный интервал) и для разрывной машины (верхний доверительный интервал) при заданной достоверности измерений 0,95.

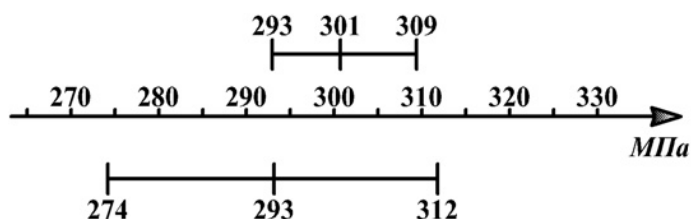


Рисунок 3. Доверительные интервалы для предела текучести стали ВСтЗпсб

Более всего интересно крайнее левое значение границы доверительного интервала для предела текучести стали ВСтЗпсб, полученного для разработанного метода, так как значение предела текучести стали там минимально. Согласно табл. 51,6 (СНиП II-23-81*), сталь ВСтЗпсб (листовой прокат толщиной до 20 мм) соответствует стали С245. В табл. 5 произведено сравнение крайней левой границы доверительного интервала для предела текучести стали ВСтЗпсб с нормативным значением предела текучести (ГОСТ 27772-88*).

Таблица 5. Значение предела текучести для исследуемой стали

Сталь	Значение σ_y , полученное разработанным методом	Значение R_{yn} , регламентированное ГОСТ 27772-88
	σ_y , МПа	R_{yn} , МПа
С245	274	245

Анализируя данные, представленные в табл. 5, можно сделать вывод, что значение предела текучести стали, полученное при помощи предложенного метода, будет не ниже нормативного значения предела текучести этой же стали, следовательно, значением предела текучести стали, полученным при помощи разработанного метода, можно пользоваться в практических целях.

Определим, во сколько раз погрешность измерения предела текучести стали ВСтЗпсб при десяти сверлениях у разработанного метода выше погрешности измерения предела текучести стали ВСтЗпсб, полученного с использованием разрывной машины.

Для этого разделим левую полуширину доверительного интервала для предела текучести стали ВСтЗпсб, полученного для разработанного метода, на левую полуширину доверительного интервала для предела текучести стали ВСтЗпсб, полученного для разрывной машины:

$$\varepsilon = \frac{\eta_{met}}{\eta_c},$$

где η_{met} – левая полуширина доверительного интервала предела текучести стали ВСтЗпсб при десяти сверлениях для разработанного метода ($\eta_{met}=294-280=14$ МПа);

η_c – левая полуширина доверительного интервала предела текучести стали ВСтЗпсб для разрывной машины ($\eta_c=301-293=8$ МПа);

ε – соотношение погрешностей измерений для рассматриваемых методов:

$$\varepsilon = \frac{14}{8} = 1,75.$$

При десяти сверлениях коэффициент вариации v для предела текучести исследуемой стали составил 9%, следовательно, необходимое количество сверлений для достижения достоверности измерения 0,95 разработанным методом согласно формуле (2) равно:

$$N = \left[\frac{1,96^2 \cdot 0,9^2}{5^2} \right] + 1 = 13шт.$$

Из рис. 3 также видно, что значение предела текучести стали ВСтЗпсб, полученное при помощи разработанного метода, сопоставимо со значением предела текучести стали ВСтЗпсб, полученного при растяжении образцов, изготовленных из этой стали, на разрывной машине.

Курлапов Д.В., Хомич В.М., Леванов А.В. Метод удельных энергий для определения механических свойств строительных сталей

В табл. 6 проведено сравнение предела текучести стали ВСтЗпсб, полученное при помощи рассматриваемых методов при заданной достоверности измерений 0,95, с нормативным значением предела текучести этой же стали согласно ГОСТ 27772-88*.

Таблица 6. Значения предела текучести для исследуемой стали

Сталь	Значение σ_y , полученное с помощью разрывной машины	Значение σ_y , полученное предложенным методом	Значение R_{yn} , по ГОСТ 27772-88
	МПа		
C245	301	293	245

Данные, представленные в табл. 6, показывают, что фактическое значение предела текучести стали в большинстве случаев выше значения, принимаемого согласно требованиям руководящих документов. В практике эксплуатации металлоконструкций известен ряд примеров, когда определение фактических значений прочностных характеристик стали позволило изыскать резервы несущей способности эксплуатируемых конструкций, и тем самым избежать дорогостоящего усиления [13].

Литература

1. Дрозд И. С. Определение механических свойств металла без разрушения. М. : Металлургия, 1965. 171 с.
2. Лимаренко В. А. Совершенствование методов определения технического состояния эксплуатируемых металлических покрытий: Автореф. Дис. ... канд. техн. Наук. Киев, 1987. 19 с.
3. Логвинов Д. Н. Определение предела текучести строительной стали через характеристики твердости по результатам экспериментального исследования // Сб. тр. докторантов и адъюнктов ВИТУ 1998. СПб., 1998. Вып. 2. С. 9-12.
4. Меандров Л. В. Об экономической эффективности производства и потребления в народном хозяйстве проката, дифференцированного по группам прочности // Металлург. 1982. №6. С. 42-43.
5. Ballio G., Mazzolani F.M., Theory and design of steel structures. London, New York: *Chapman and Hall*, 2002. 427 p.
6. Mott Neville F., Jones H. The Theory of the Properties of Metals and Alloys. London, 2007. 184 p.
7. Леванов А. В. Способ определения фактических прочностных характеристик эксплуатируемых стальных конструкций и их соединений // Сб. научных статей сотрудников университета. СПб., 2009. Вып. 10. С. 47-51.
8. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. М. : Наука, 1976. 607 с.
9. Адлер Ю. П., Макарова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 278 с.
10. Ашмарин И. П., Васильев Н. Н., Амбросов А. В. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. С. 76.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высшая школа, 2003. 480 с.
12. Пухаренко Ю. В., Хомич В. М., Леванов А. В. Метод сверления для определения пределов текучести элементов строительных стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2011. №3. С. 17-32.
13. Колесниченко В. Г., Щурина Н. Б. Выявление резерва несущей способности металлических конструкций сооружений // Промышленное строительство. 1972. №6. С. 28-29.

**Александр Викторович Леванов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +79046371249; эл. почта: alex_lev83@mail.ru

Method of specific energy for determination mechanical characteristics of structural steel

D.V. Kurlapov;
V.M. Khomich;
A.V. Levanov,

Military engineering-technical institute, Saint-Petersburg, Russia
+7(904)637-12-49; e-mail: alex_lev83@mail.ru

Key words

yield limit of structural steel; method; structural steel; specific energy; device

Abstract

The studies performed in present article are directed on improvement the practical methods of the existing steel structures examination. In particular, the new method for the determination of the mechanical properties of steel structure elements of the existing buildings and structures is offered. It consists in drilling a reference sample, made of structural steel, which have already been defined for mechanical properties of steel, and also the material of investigated structural element with the following determination of specific energy, expended during drilling of channels in the reference sample and in material of the investigated steel structure, in order to the further determination of the strength properties of steel, from which the element is made.

The article also presents experimental studies on the determination of strength properties of the structural steels VSt3ps6 and 15HSND, which results have shown the possibility of the determination of strength properties of the investigated material with necessary reliability of the measurements using the proposed method.

In particular, there were determined:

- yield limit of steel VSt3ps6 and steel 15HSND;
- temporary resistance of steel VSt3ps6 and steel 15HSND.

During analyzing the domestic and foreign literature it was found that elements of existing steel structures have reserve strength, which is inevitably formed on the basis of designing logic and normative documents, used in steel structures calculations. It was completely confirmed by experimental tests.

References

1. Drozd I. S. *Opredeleniye mekhanicheskikh svoystv metalla bez razrusheniya* [The determination of mechanical properties of metal without breaking]. Moscow : Metallurgiya, 1965. 171 p. (rus)
2. Limarenko V. A. *Sovershenstvovaniye metodov opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruyemykh metallicheskih pokrytiy* [The improvement of the methods for determination the technical condition of exploited metallic covering]. Thesis of candidate of technical sciences. Kiev, 1987. 19 p.(rus)
3. Logvinov D. N. *Sbornik trudov doktorantov i adyunktov VITU* [Proceedings of the doctoral candidates and adjuncts Vitu 1998]. Saint-Petersburg, 1998. Issue 2. Pp. 9-12. (rus)
4. Meandrov L. V. *Metallurg* [Metallurgist]. 1982. No. 6. Pp. 42-43. (rus)
5. Ballio G., Mazzolani F. M. *Theory and design of steel structures*. London; Ney York: Chapman and Hall, 2002. 427 p.
6. Neville F. Mott, Jones H. *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*. London, 2007. 184 p.
7. Levanov A. V. *Sbornik nauchnykh statey sotrudnikov universiteta* [Collected articles of university employees]. Saint-Petersburg, 2009. Issue10. Pp. 47-51. (rus)
8. Belyayev N. M. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka, 1976. 607 p. (rus)
9. Adler Yu. P., Makarova Ye. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning the experiment for searching of the optimal conditions]. Moscow : Nauka, 1976. 278 p. (rus)

10. Ashmarin I. P., Vasilyev N. N., Ambrosov A. V. *Bystryye metody statisticheskoy obrabotki i planirovaniye eksperimentov* [The quick methods of the statistical analysis and experiment planning]. Leningrad : Izdatelstvo leningradskogo universiteta, 1975. 76 p. (rus)
11. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow : Vysshaya shkola, 2003. 480 p. (rus)
12. Pukhareno Yu. V., Khomich V. M., Levanov A. V. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2011. No. 3. Pp. 17-32. (rus)
13. Kolesnichenko V. G., Shchurina N. B. *Promyshlennoye stroitelstvo* [Industrial engineering]. 1972. No. 6. Pp. 28-29. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 11-17