

СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ И ВОПРОСЫ РАСШИРЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

MODERN RUSSIAN STANDARDS AND ISSUES OF THE EXPANDING OF METAL STRUCTURES IN CONSTRUCTION

И. И. ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук, проф.

П. Д. ОДЕССКИЙ, д-р техн. наук, проф.

Обсуждаются достигнутый в настоящее время высокий уровень качества металла и расширение сортимента для строительных металлических конструкций, что закреплено в новых стандартах на прокат листовой и фасонный, трубы, а также в нормах проектирования. Показано, что применение современных сталей с высокой прочностью и хладостойкостью, огнестойкостью и коррозионной стойкостью имеет высокую экономическую эффективность и служит предпосылкой необходимого в настоящее время расширения применения металлических конструкций в строительстве.

The current high level of metal quality and the expansion of the assortment for building metal structures, which is enshrined in new standards for sheet and shaped steel, pipes, as well as in design standards, are discussed. It is shown that the use of modern steels with high strength and cold resistance, fire resistance and corrosion resistance has high economic efficiency and is a prerequisite for the currently needed expansion of the use of metal structures in construction

Ключевые слова:

Строительные металлические конструкции, стальной прокат, трубы, стандарты на поставку, норма проектирования.

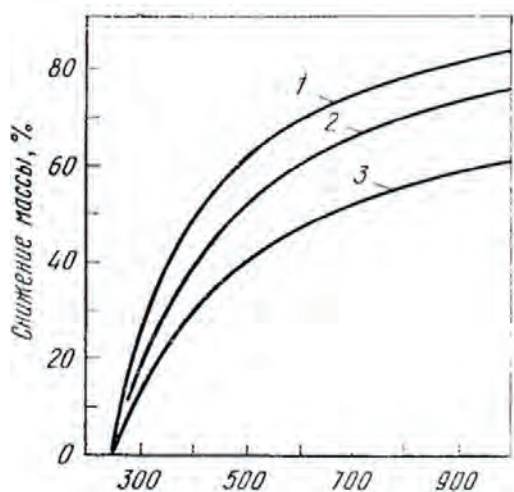
Key words:

Building metal structures, rolled steel, pipes, standards for supply, design rate

Одним из основных видов продукции черной металлургии является листовой прокат и профили из сталей с пределом текучести $\sigma_T = 200-700 \text{ Н/мм}^2$, предназначенные для металлических конструкций, как правило, сварных (каркасов гражданских, общественных и промышленных зданий, башен, мачт, резервуаров, мостов, трубопроводов и др.). Конкурентоспособность металлических конструкций по сравнению с сооружениями из

других материалов определяется преимущественно по эксплуатационным свойствам, технологичности производства, сортаменту, и в первую очередь, по экономической эффективности. Что касается строительной отрасли, стоимость металла составляет около половины общей стоимости металлических конструкций. Поэтому основной способ снижения цены конструкции, т.е. повышение её экономической эффективности, заключается в уменьшении её массы. Этого в первую очередь можно добиться, применяя экономнолегированные стали, особенно — в эффективных профилях повышенной и высокой прочности.

Поэтому развитие сталей и сортамента во многом обусловлено именно требованием экономической эффективности. Это требование также определяет современную схему производства проката в металлургии: известно, что в настоящее время технологии и конструкции агрегатов по производству сталей развиваются с учетом необходимости экономии энергетических ресурсов.



$\sigma_t, \text{Н/мм}^2$

Рис. 1. Изменение целесообразности повышения прочности стали: 1 — тяжелые пролетные строения с большой длиной пролета; 2 — растянутые элементы конструкций; 3 — конструкция каркаса промышленного здания (на сжатые элементы приходится более 40% массы)

Хорошо известны данные расчетов [2] (рис. 1), где показано увеличение экономии металла при повышении прочности стали на примере конструкций промышленных зданий. В [5] для случая применения электросварных труб круглого сечения высокой прочности с $\sigma_t \geq 390 \text{ Н/мм}^2$ была установлена возможность снижения массы конструкции до 50%, и даже 55% при применении стали с $\sigma_t = 590 \text{ Н/мм}^2$. В [7] отмечается, что снижение расхода металла, связанное с применением сталей высокой прочности и экономичных профилей, также уменьшает трудоёмкость изготовления и монтажа, при этом условно высвобождается определённая численность рабочих.

В последние 5 лет был разработан и вступил в действие ряд специальных стандартов на поставку строителям металла, высокое качество которого определялось новей-

шими технологическими достижениями отечественной металлургии.

Это прежде всего новый стандарт на поставку толстолистовой стали и фасонных профилей ГОСТ 27772-2015; это стандарт на электросварные трубы ГОСТ Р 58064-2018 (сечением 1420×48 мм включительно), а также бесшовные; это отдельный стандарт на широкополочные двутавры с параллельными гранями полок ГОСТ Р 37837-2017, особо эффективные Н-образные сечения без сварных швов.

В табл. 1 представлены сопоставительные данные по химическому составу в зависимости от прочности сталей, поставляемых вплоть до последнего времени по ГОСТ 27772-88 (знаменатель) и другим стандартам, а в настоящее время – по ГОСТ 27772-2015 (числитель).

Таблица 1

Требования по химическому составу сталей для металлических конструкций по ГОСТ 27772-88 и ГОСТ 2015

Уровень прочности	σ_b , Н/мм ²	Стали по стандарту	Содержание элементов, масс. %			
			C	S	P	C _s
			не более			
Обычный	Менее 290	<u>C245, C255</u> C235, C245, C255, C275, C285	<u>0,17</u> 0,22	<u>0,025</u> 0,050	<u>0,035</u> 0,040	-
Повышенный	От 290 до 390	<u>C355, C355-1, C355K, C355П</u> C345, C375	<u>0,14</u> 0,15	<u>0,015</u> 0,040	<u>0,017</u> 0,035	<u>0,45</u> -
Высокий	От 390 до 550	<u>C390, C390-1, C440</u> C390, C440	<u>0,12</u> 0,18; 0,20	<u>0,010</u> 0,040	<u>0,017</u> 0,035	<u>0,46</u> 0,49; 0,51
Особо высокий	От 550 и более	<u>C550, C590</u> C550, 590K	<u>0,10</u> 0,14	<u>0,004</u> 0,035	<u>0,015</u> 0,035	<u>0,54</u> -

Со времени составления ГОСТ 27772-88 уровни прочности, а точнее, потребности строителей в прокате различной прочности изменились мало (см. табл. 1): уменьшилось количество сталей обычной прочности и, что более важно, в качестве стали повышенной прочности предложено применять сталь С355 вместо стали С345 и С375. Такое изменение связано с двумя причинами: фактически сталь повышенной прочности выпускается именно со свойствами С355; кроме того, такая сталь гармонизируется со сталью S355, выпускаемой по действующим евро нормам EN 10025, и с достаточно широко применяемой и выпускаемой в России. Преимущества стали С355 по сравнению со сталями С345, особенно при больших толщинах, хорошо видны из данных табл. 2.

Таблица 2

Прочностные характеристики сталей С345 и С355 по ГОСТ 27772

Сталь	Диапазон толщин, мм	σ_{10} , Н/мм ²	σ_b , Н/мм ²
C345 C355	От 20 до 40 вкл.	305 345	460 470
C345 C355	От 40 до 60 вкл.	285 335	450 470
C345 C355	От 60 до 80 вкл.	275 325	440 470

Видно, что сталь С355 существенно прочнее, т.е. её применение приводит к дополнительному снижению массы конструкций. В новые стандарты на электросварные трубы для строительных конструкций включены трубы, в том числе больших диаметров, высокой прочности — от С390 до С690 включительно. В ГОСТ 26020-83 «Двутавры горячекатаные с параллельными гранями полок» включены профили со свойствами С390 и С440.

Ранее применялись трубы и профили не прочнее С345. В новые действующие строительные нормы СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*» включены требования к указанным трубам и профилям высокой прочности.

Как видно из табл. 1, в новом стандарте закреплены описанные выше достижения металлургии в части оптимизации химического состава обсуждаемых сталей. При сравнении сталей одинаковой прочности видно, что существенно понижено содержание углерода, особенно вредных примесей, а также общее содержание легирующих элементов, что отражается на величине углеродного эквивалента C_{eq} .

Изменения в химическом составе существенно усиливаются по мере повышения прочности стали. Представленные ограничения на химический состав прежде всего обеспечивают хорошую свариваемость проката. При этом следует иметь в виду, что более 60% отказов в металлических конструкциях обусловлено дефектами в сварных соединениях. Низкие величины C_{eq} , особенно в случае сталей высокой прочности, обеспечивают достаточно высокое сопротивление холодным трещинам; низкое содержание вредных примесей, в первую очередь серы, способствует устранению горячих и слоистых трещин; снижение содержания углерода и вредных примесей положительно влияет на хладостойкость сварных соединений. Ограничения по химическому составу, представленные в табл. 1, регламентированы в современных нормах на проектирование строительных стальных конструкций СП 16.13330.2017.

Стандарт ГОСТ 27772-2015 допускает определенную вариативность химического состава сталей с механическими свойствами С355 (С355, С355-1, С355К и С355П) и С390 (С390, С390-1), что связано как с современными схемами упрочнения проката, так и с областями использования. Стали С355, С390 и С440 имеют химический состав типа 09Г2ФБ, удобный для упрочнения по наиболее эффективной схеме термомеханической прокатки с последующим охлаждением [8], но также и по традиционным схемам нормализации или термического улучшения [9].

Прокат С355-1 и С390-1 изготавливается из термически упрочнённых сталей с повышенной коррозионной стойкостью второго поколения — многокомпонентных сталей типа 15ХСНДА и 10ХСНДА соответственно, широко применяемых в уникальных строительных, мостостроительных конструкциях и т.п.

Стали С355К и С355П – коррозионностойкая и огнестойкая (пожаростойкая) стали соответственно. Их химический состав в сопоставлении со сталями С355 и С355-1 (15ХСНДА) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав сталей С355 по ГОСТ 27772-2015

Сталь	Содержание элементов, %											
	C, не более	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Zr
				Не более								
C355	0,14	1,00-1,80	0,15-0,80	0,015	0,017	0,10-0,30	0,10-0,30	0,10-0,30	-	≤0,08	≤0,06	-
C355-1	0,15	0,60-0,90	0,40-0,70	0,015	0,017	0,60-0,90	0,30-0,60	0,20-0,40	-	-	-	-
C355K	0,15	0,80-1,10	0,40-0,60	0,015	0,020	0,50-0,70	0,50-0,70	0,40-0,70	-	-	-	0,005-0,020
C355П	0,10	0,60-0,90	0,15-0,35	0,015	0,020	0,50-0,80	0,10-0,30	≤0,030	0,08-0,20	0,06-0,09	0,02-0,04	-

Сталь С355-1 соответствует европейской стали COR TEN B, С355К – COR TEN A. Огнестойкость стали С355П обеспечивается легированием Mo-Cr-Nb-V, особенно в случае термомеханической прокатки с ускоренным охлаждением.

В качестве сталей для проката высокой прочности С550, С590 приняты стали с молибденом типа 08МГ2ФБ, в которых в толщинах до 50 мм обеспечивается требуемый высокий комплекс свойств при упрочнении по схемам термомеханической прокатки с последующим ускоренным охлаждением.

В настоящее время большое внимание уделяется производству металла с высокой хладостойкостью, что особенно важно в связи с происходящим в последние годы широким хозяйственным освоением Арктики.

При возведении крупных строительных объектов в этом районе имеются большие риски экономических и экологических потерь в случае отказов элементов конструкций [10]. Поэтому строительство должно быть обеспечено металлом с высокой хладостойкостью.

В сталях, производимых на современных металлургических предприятиях по ГОСТ 27772-2015, реализована концепция обеспечения высокого сопротивления разрушению: формирование в прокате высокодисперсной структуры в сочетании с высокой чистотой по вредным примесям. Прежде всего это относится к прокату высокой прочности, в котором после термомеханической прокатки формируется многослойная структура с размерами структурного элемента ~ 1 мкм (рис. 2).

Эффективной стандартной характеристикой при оценке сопротивления разрушению является ударная вязкость при отрицательных температурах.

Традиционно (с начала XX в.) в нашей стране для оценки ударной вязкости применялся образец с U-образным надрезом (тип 1 по ГОСТ 9454-78). В то же время в рассматриваемых современных стандартах закреплено использование технологий, направленных на измельчение зерна и широко освоенных в отечественной металлургии

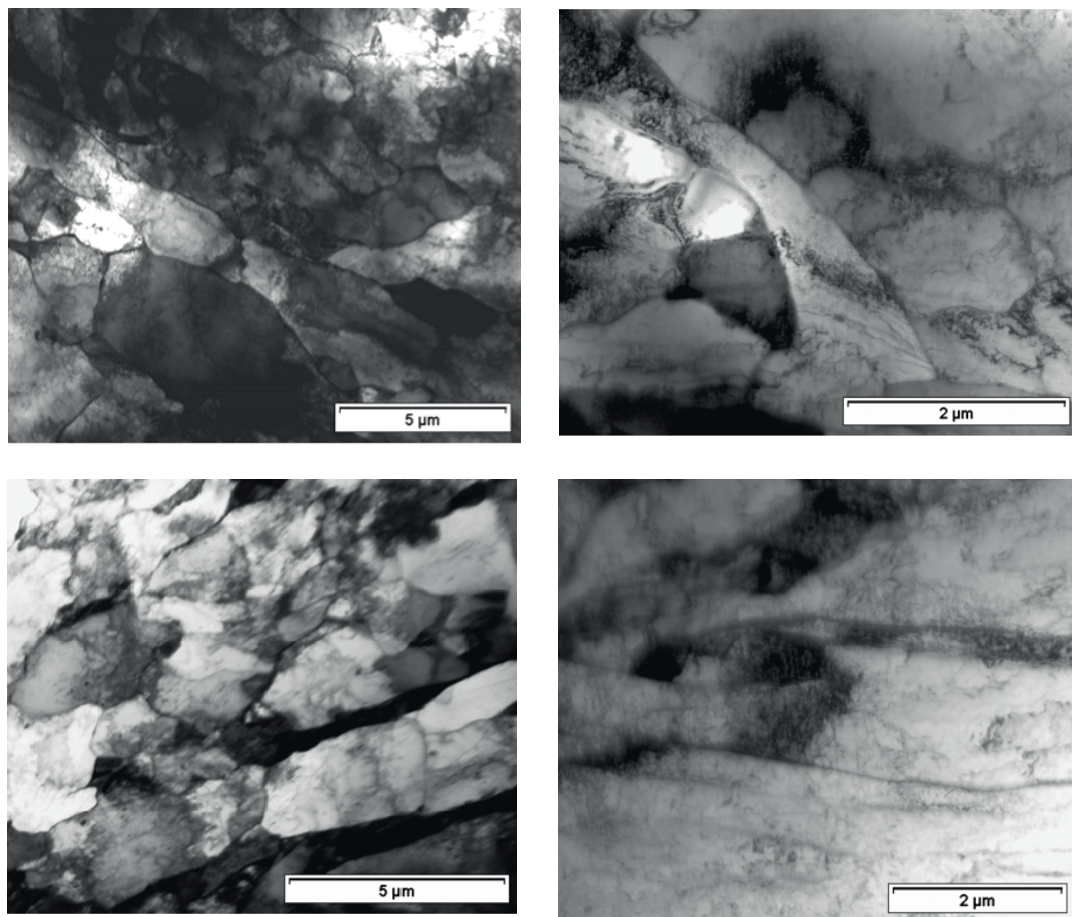


Рис. 2. Тонкая структура проката С550. Просвечивающая электронная микроскопия тонких фольг

(нормализация, улучшение, термомеханическая обработка по различным схемам и др.).

В ряде наших работ [11] было показано, что вязко-хрупкий переход сталей с дисперсной структурой, которая имеет место в современных материалах, хорошо описывается при испытаниях на ударный изгиб образцов с острым надрезом.

С учетом этого при разработке новых стандартов в качестве основного образца для испытаний на ударный изгиб был принят именно образец с V-образным надрезом (тип 11 по ГОСТ 9454). Оценка величины ударной вязкости KCV позволила также гармонизировать отечественные нормы с европейскими.

Принятие в ГОСТ 27772-2015 гарантии по ударной вязкости (табл. 4) полностью соответствуют требованиям современных строительных норм (табл. 5). Принятый в новом стандарте переход на образец с V-образным надрезом фактически закрепил возможность существенного повышения сопротивления разрушению современных сталей по сравнению со сталями, регламентированными ГОСТ 27772-88. Так, при одинаковом критериальном значении ударной вязкости 34 Дж/см² переход от KCU к KCV обеспечивает повышение хладостойкости примерно на 40 °С.

Таблица 4

**Гарантии по ударной вязкости ГОСТ 27772-2015 листового
и широкополочного универсального проката**

Стали	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²			
	при температуре, °C			
	0	-20	-40	-60
C245	34	-	-	-
C255	34	34	-	-
C355, C355-1, C355K, C355П	-	34	34	34
C390, C390-1, C440	-	-	34	34
C550, C590	-	-	-	66

Таблица 5

Нормируемые показатели ударной вязкости проката по СП 16.23330.2017

Расчетная температура, °C	Группа конструкции	Предел текучести проката, Н/мм ²							
		$R_{yn} < 290$		$290 \leq R_{yn} < 390$		$390 \leq R_{yn} < 490$		$R_{yn} \geq 490$	
		Показатели ударной вязкости, Дж/см ²							
		KCV		KCV		KCV		KCV	
		При температуре испытаний на ударный изгиб, °C							
		+20	0	-20	-20	-40	-40	-60	-60
$T \geq -45$	1,2,3	34	-	-	34	-	34	-	40
$-45 > t \geq -55$	1	-	-	34	-	34	34	-	40
	2,3	-	34	-	34	-	34	-	40
$t < -55$	1,2,3	-	-	34	-	34	-	34	40

Прокат, поставляемый по ГОСТ 27772-2015, а также трубы по ГОСТ Р 58064-2018 имеют высокое сопротивление разрушению и обеспечивают надежную работу зданий и сооружений, в том числе эксплуатируемых в районах Арктики и Сибири, что также имеет существенное экономическое значение.

Рассмотрим основные направления расширения применения металлических конструкций в строительстве.

Описанное выше повышение качества стали, позволившее нормировать в строительстве применение проката с высокими потребительскими свойствами, привело к изменению структуры применения металла с различными механическими свойствами: если в 80-х годах прошлого века потребление проката обычной, повышенной и высокой прочности соотносилось как 100:10:1, то в настоящее время прокат высокой прочности

С390 и С440, а также трубы и широкополочные двутавры из них, обладающие высокими эксплуатационными свойствами, применяются самым широким образом. Применение такого проката и труб из него представлено на рис. 3, рис. 4 и рис. 5 (конструкции покрытий стадионов «Динамо», «Спартак», «Самара Арена»). Применение широкополочных двутавров и труб высокой прочности при строительстве высотного здания «Лакта-центр» представлено на рис. 6.



Рис. 3. Конструкции из труб высокой прочности при строительстве стадиона «Динамо» (ВТБ-Арена) в г. Москва



Рис. 4. Конструкции из труб высокой прочности при строительстве стадиона «Спартак» в г. Москва



Рис. 5. Конструкции из труб высокой прочности при строительстве стадиона «Самара Арена» в г. Самара



Рис. 6. Конструкции высокой прочности при строительстве «Лакhta-центра» в г. Санкт-Петербурге: вверху — из труб; слева — из проката

В настоящее время в г. Москве намечено строительство крупного здания с объемом применения проката и труб высокой прочности с общей массой более 40 тыс. т.

Намечается возведение высотных зданий с применением толстолистовой стали С690 в толщинах до 100 мм включительно, для чего специально разработана технология сварки.

Перспективным является новое направление применения сталей повышенной и вы-

сокой прочности, особенно — двутавровых широкополочных балок, не только при возведении уникальных зданий, но и при массовом строительстве, в том числе жилищном, известны реальные примеры подобного применения.

Широкое внедрение сталей высокой прочности обусловлено тем, что современные металлические конструкции, спроектированные по действующим нормам из проката, произведённого по новым стандартам, характеризуются минимальным расходом массы применённого металла в зданиях и сооружениях, что ведёт к экономии стоимости сооружений (стоимость металла составляет около половины стоимости конструкций, улучшенная планировка), а также к снижению расходов на изготовление и монтаж конструкций, что в целом ведёт к снижению металлоёмкости в строительстве.

Достигнутое повышение сопротивления металла разрушению, обеспечение высокой хладостойкости ведет к повышению надежности конструкций при эксплуатации, к увеличению их долговечности и уменьшению вероятности отказов, в первую очередь — к снижению экономических, экологических и социальных рисков при возведении сооружений, в тяжелых климатических условиях Севера, Сибири и Арктики, где в настоящее время началось строительство крупных строительных объектов (Мурманская верфь, заводы по производству сжиженных газов, здания соответствующей инфраструктуры и т.п.) с применением металлических конструкций из современных сталей с высокой хладостойкостью.

Примером новой области широкого использования материалов с высокой ударной вязкостью KCV⁻⁶⁰ является примененное при изготовлении свайных оснований зданий и сооружений в условиях Крайнего Севера электросварных прямошовных труб повышенной и высокой прочности диаметром 219...1020 мм с толщиной стенки 8...12 мм производства Выксунского МЗ [12].

Для производства и применения таких труб были разработаны специальные ТУ и рекомендации по применению.

Разрабатываются новые конструкции из огнестойких сталей (например, для автомобильных парковок), а также конструкции из коррозионностойких сталей, не требующих окраски (выпускаются соответствующие мостовые конструкции, а также трубы для «северных» конструкций).

Наконец, следует отметить большое увеличение объемов применения тонкостенных профилей самых различных сечений в конструкциях самого широкого назначения (ангары, склады, производственные помещения и даже жилищное строительство). Из подобных профилей воздвигаются здания с пролетами до 100 м (рис. 7 и 8).



Рис. 7. ОАО «НЛМК», склад огнеупоров (бескаркасное здание)

В целом можно отметить, что высокий уровень современного производства сталей для строительства обеспечивает надежность в эксплуатации строительных металлических конструкций (при минимизации их массы и экономии дорогостоящих огне- и коррозионностойких покрытий, что обеспечивает их высокую конкурентную способность и тем самым создает предпосылки для расширения областей их применения, что мы и наблюдаем в настоящее время.



Рис. 8. Здание автоматизированного склада

Библиографический список

1. Металлические конструкции. Работы школы Н.С. Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1966.
2. Мельников Н.П. Развитие металлических конструкций. – М.: Стройиздат, 1965.
3. Металлические конструкции: сборник статей ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко / Под ред. В.А. Балдина – М.: Стройиздат, 1968.
4. Соколовский П.И. Малоуглеродистые и низколегированные стали. – М.: Металлургия, 1966.
5. Стальные конструкции из труб: сборник статей ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко / Под ред. С.А. Ильсевича – М.: Стройиздат, 1973.

6. Жербин М.М. Высокопрочные строительные стали. – Киев: Будівельник, 1974.
7. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. и др. Металлические конструкции. 9-е изд. / Под ред. Ю.И. Кудишина. – М.: Академия, 2007.
8. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М.: Металлургиздат, 2012.
9. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Рудченко А.В. Строительная сталь. – М.: Металлургиздат, 2002.
10. Фортон В.Е., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М. Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики. – Красноярск: СФУ, 2018.
11. Одесский П.Д. Развитие подходов к оценке сопротивления разрушению стали для строительных металлических конструкций и современные стандарты // Деформация и разрушение материалов. — 2018. — №1. — С. 29-40.
12. Одесский П.Д., Вершинин Я.В., Алексеев А.Г., Звездов А.А. Свойства электросварных прямошовных труб для свайных оснований, возводимых в условиях криолитозоны // Деформация и разрушение материалов. — 2019. — №6. — С. 26-30.

Авторы:

Иван Иванович ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук, проф., директор ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ivan VEDYAKOV, D. Sci. (Engineering), Full Professor, Director of TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: vedykov@gmail.com

тел.: +7 (499) 171-26-50; +7 (499) 170-10-60

Павел Дмитриевич ОДЕССКИЙ, проф., д-р техн. наук, заведующий сектором прочности проката и соединений Лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Pavel ODESSKIY, D. Sci. (Engineering), Full Professor, Head of the Section of strength of rolled metal and compounds of the Laboratory of Metal TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: odesskiy@tsniisk.ru

тел.: +7 (499) 174-77-77