

## ОСОБЕННОСТИ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ СТАЛИ ДЛЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

**В** процессе эксплуатации доменных печей огнеупорная футеровка и кожухи подвергаются повышенным длительным или кратковременным температурным воздействиям, связанным с протекающими в них технологическими процессами и нередко превышающими по величине их штатные значения.

Ситуация осложняется износом или разрушением огнеупорной футеровки, происходящими в течение эксплуатации, в связи с чем возникает реальная угроза перегрева кожуха, что усугубляется имеющими место нарушениями в работе системы охлаждения.

И если температурные воздействия на футеровку приводят к увеличению механических нагрузок на кожух печи, то перегрев последнего вызывает изменения и деградацию физико-механических свойств его материала.

Проблема формализации воздействия температуры осложняется нестабильностью ее распределения внутри печи, зависящего от многих технологических факторов, в т.ч. от качества шихтовых материалов, движения газовых потоков, количества и температуры дутья, технологического режима и др. Так, при периферийном ходе газов температура кладки футеровки и, соответственно, кожуха увеличивается.

Область, в которой отмечают наиболее высокие нагрузки, зависит также от типа печи, особенностей ее загрузки, ведения технологического процесса и пр.

Картина температур по высоте внутри доменной печи показана на рис. 1 [10], из которого видно весьма сложное, изменяющееся в процессе эксплуатации печи, поле распределения изотерм. Наибольшая температура обычно отмечается в районе фурменной зоны, где циркулируют газы, нагретые, примерно, до 2300 °С. В зоне, расположенной ниже, наблюдается температура 1400–1500 °С, вызванная опускающимися продуктами плавки и раскаленной шихтой.

Достаточно высоким воздействиям от перепадов температур подвергаются распар и нижняя часть шахты, а также горн, где про-



**А.Е. Любин**  
генеральный директор корпорации  
«Промстальконструкция»,  
к.т.н.

исходит горение топлива со значительным изменением температуры по радиусу горна на уровне фурменных приборов. Так, если температура вблизи торца фурмы составляет 1650–1700 °С, то в фокусе горения она повышается до 1850–2300 °С [3].

Проведенные измерения температуры горячей поверхности футеровки показали ее резкие перепады: только в течение нескольких минут температура изменялась от 150 до 1000 °С и более. Максимальные перепады температуры были отмечены в нижней части шахты.

Многолетние исследования этой проблемы позволили также установить средние параметры температурных полей и их распределение по высоте и поперечному сечению печи.

Изменение температуры как материалов, так и газов по высоте печи, вызываемое теплопередачей от движущихся вверх газов к опускающимся вниз материалам, происходит неравномерно по высоте и в радиальном направлении. В нижней части печи при температуре выше 1400–1500 °С теплообмен между газами и материалами наиболее интенсивен. В этой зоне тепло расходуется не только на нагрев материалов, но и на процессы, происходящие с поглощением тепла, но без изменения температуры материалов (расплавление шихты, прямое восстановление элементов). В результате в этой области происходит резкое падение температуры газов и материалов, достигающее 500 °С. В верхней части печи теплообмен между газами и шихтой снова усиливается, что связано с загрузкой в печь холодных материалов.

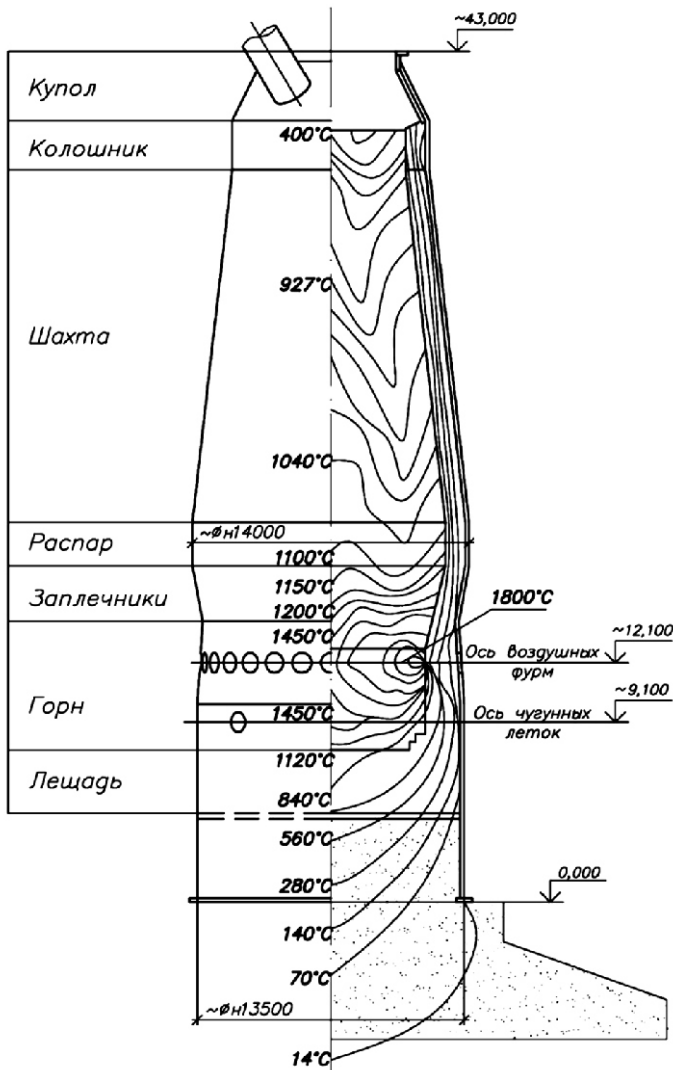


Рис. 1. Распределение температур по высоте доменной печи

Температура отходящих из печи колошниковых газов составляет 150–400 °С, но в отдельных случаях, при нарушениях технологического процесса, может достигать 450–600 °С, что опасно с точки зрения возможного перегрева кожуха купола и колошника печи.

Изменение температуры по сечению печи определяется качеством шихтовых материалов и их распределением на колошнике. При нормальной работе печи максимальная температура возникает у оси печи, а у ее стен она несколько ниже и изменение температуры описывается плавной кривой. При нарушениях в распределении материалов и газов изменяется и характер распределения температур по сечению печи. Такая взаимосвязь между параметрами технологического процесса и температурными полями внутри печи затрудняет формализацию их учета при оценке прочности и надежности конструкций.

Следует также отметить, что температурные воздействия, кроме того, вызывают рост кожухов агрегатов по вертикали. Так, исследования показали неравномерный по периметру рост кожуха доменной печи до 4–5 мм, наблюдаемый на 6–8-е сутки при установившемся режиме, что свидетельствует о неравномерности его нагрева [11].

Воздействие в процессе эксплуатации высоких температур, кроме создания механических нагрузок на кожух, оказывает значительное влияние на свойства его материала, снижая его надежность и долговечность.

Как основные следствия таких воздействий следует отметить:

- изменение физико-механических характеристик стали при нагревании;
- появление при локальных внезапных нагревах (тепловых ударах) тепловых пятен, в которых возникают усилия, резко меняющие характер местного и общего напряженного состояния;
- температурные деформации элементов конструкции при нагреве, вызывающие дополнительные усилия;
- в материале кожуха развиваются процессы охрупчивания, которые повышают риск хрупкого разрушения.

Учитывая это, особого внимания требует выбор стали для кожуха доменной печи, которая, воспринимая отмеченные воздействия,

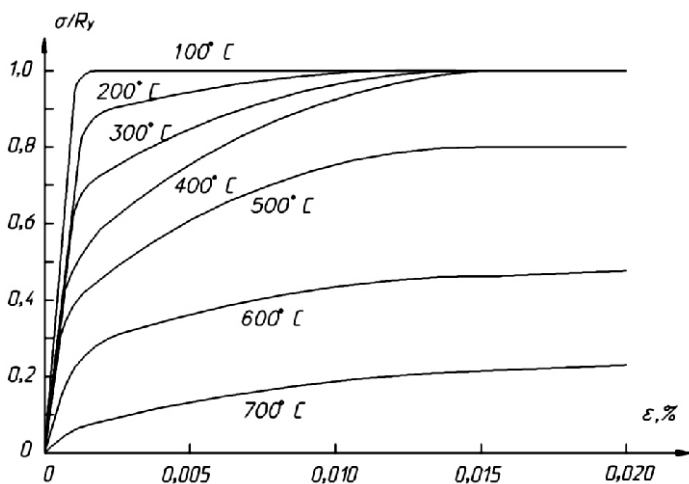


Рис. 2. Изменение свойств конструкционной стали при увеличении температуры

должна обеспечивать его прочность и долговечность при воздействии повышенной  $t^{\circ}$ . Целесообразно проследить характер поведения традиционно применяемых сталей и изменения их физико-механических свойств при нагреве.

Хотя не все применяемые стали ведут себя одинаково при повышенных температурах, однако общим для них является заметное снижение механических характеристик при нагревании. На рис. 2 [7] приведены графики зависимости напряжения–деформации обычной конструкционной стали при нагреве, показывающие, что нагрев до температуры 400 °С и далее приводит к уменьшению несущей способности в два раза и более до полной ее потери.

При повышении температуры до 150–200 °С значения предела текучести  $R_y$  и временного сопротивления  $R_{ин}$  практически не меняются. Падение механических характеристик начинается за пределом температуры 200 °С, с которой значение предела текучести  $R_y$  начинает снижаться. Для малоуглеродистых сталей, при этом, характерно некоторое повышение предела текучести  $R_y$  и временного сопротивления  $R_{ин}$  с достижением максимума при 200–300 °С и резким понижением при дальнейшем росте температуры. При температуре более 400–500 °С эти показатели резко падают.

При повышении температуры до 550 °С значение предела текучести  $R_y$  снижается на 55 %, а значение модуля упругости  $E$  – на 25 %. В то же время коэффициент линейного расширения увеличивается. При этом произведение величин коэффициента линейного расширения и модуля упругости остается неизменным.

При температуре 600 °С значения пределов текучести  $R_y$  и временного сопротивления  $R_{ин}$  практически близки к нулю.

В таблице 1 приведены значения модуля упругости  $E$  и коэффициента линейного расширения при разных температурах нагрева малоуглеродистой стали [8].

Характерно, что величина модуля упругости стали при воздействии высокой температуры меняется не только с ее повышением, но и с ростом действующих в конструкции напряжений (рис. 3) [10].

В диапазоне температур до 200 °С резко ухудшаются показатели относительного удлинения стали, что свидетельствует о снижении ее пластических свойств. Так, при нагреве до 200 °С

относительное удлинение снижается на 50 % и в дальнейшем, с повышением температуры, увеличивается в среднем на 25 % на каждые 100 °С. Сталь при температурах 220–300 °С становится хрупкой, «синеломкой».

Таблица 1

Значения модуля упругости  $E$  и коэффициента линейного расширения малоуглеродистой стали при ее нагреве

Температура, °С	Модуль упругости $E$ , кПа	Коэффициент линейного расширения, $\alpha$ , м/(м °С)
20	2,05 $\cdot 10^4$	1,18 $\cdot 10^{-5}$
75	1,99 $\cdot 10^4$	1,20 $\cdot 10^{-5}$
100	1,975 $\cdot 10^4$	1,22 $\cdot 10^{-5}$
125	1,95 $\cdot 10^4$	1,24 $\cdot 10^{-5}$
150	1,93 $\cdot 10^4$	1,25 $\cdot 10^{-5}$
175	1,915 $\cdot 10^4$	1,27 $\cdot 10^{-5}$
200	1,875 $\cdot 10^4$	1,28 $\cdot 10^{-5}$
225	1,847 $\cdot 10^4$	1,30 $\cdot 10^{-5}$
250	1,82 $\cdot 10^4$	1,31 $\cdot 10^{-5}$
275	1,79 $\cdot 10^4$	1,32 $\cdot 10^{-5}$
300	1,755 $\cdot 10^4$	1,34 $\cdot 10^{-5}$
325	1,727 $\cdot 10^4$	1,35 $\cdot 10^{-5}$
350	1,695 $\cdot 10^4$	1,36 $\cdot 10^{-5}$
375	1,665 $\cdot 10^4$	1,37 $\cdot 10^{-5}$
400	1,63 $\cdot 10^4$	1,38 $\cdot 10^{-5}$
425	1,60 $\cdot 10^4$	1,40 $\cdot 10^{-5}$

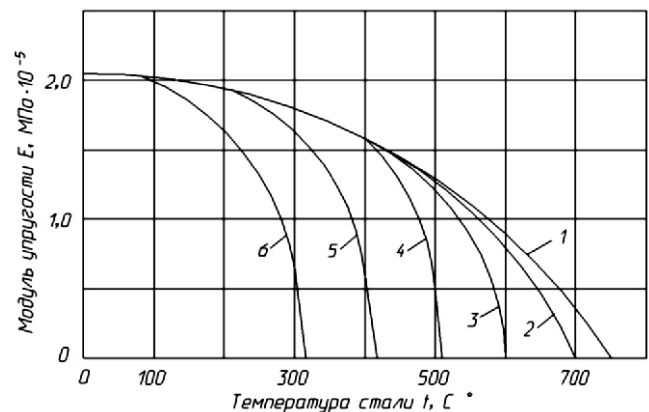


Рис. 3. Модуль упругости малоуглеродистой стали при разных температуре и напряжениях:

1–6 – модули упругости стали при напряжениях соответственно 0; 50; 100; 150; 200; 250 МПа

Зависимость механических свойств малоуглеродистых сталей от температуры, демонстрирующая их падение с повышением температуры, показана на рис. 4. При температуре 600 °С временное сопротивление  $R_{ин}$  становится близким к нулю, т.е. несущая способность стали в конструкциях исчерпывается [6].

Для численной оценки значений предела текучести при повышении температуры некоторые зарубежные нормы предлагают применять понижающие коэффициенты, величина которых зависит от температуры нагрева металла. Одно из таких предложений приведено в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты понижения значений предела текучести  $R_y$  малоуглеродистой стали при ее нагреве

Температура металла, °С	Коэффициент
0–200	1
250	0,75
300	0,67
350	0,60
400	0,50

Другие источники рекомендуют конкретные показатели прочности стали при повышенных температурах, значения которых для некоторых марок стали приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения расчетного сопротивления стали при изменении температуры

№ п/п	Температура, °С	Расчетное сопротивление, МПа			
		Марка стали			
		ВСтЗкп	ВСтЗсп/пс	О9Г2С	10Г2С1
1	20	200	210	290	290
2	200	170	180	230	240
3	250	150	150	220	230
4	275	–	150	210	220
5	300	–	140	200	210
6	350	–	–	180	200
7	400	–	–	150	170
8	450	–	–	100	110
9	500	–	–	–	–

Большое влияние температура оказывает на показатель ударной вязкости, который, начиная с температуры 100 °С, постепенно снижается (рис. 5).

Анализируя поведение малоуглеродистых сталей при повышении температуры эксплуатации, можно сделать следующие выводы:

1) предел текучести  $R_y$  и временное сопротивление  $R_{ин}$  практически сохраняются до температуры примерно 200 °С. При большем нагреве наблюдается снижение прочностных свойств с полной их потерей при температуре около 600 °С;

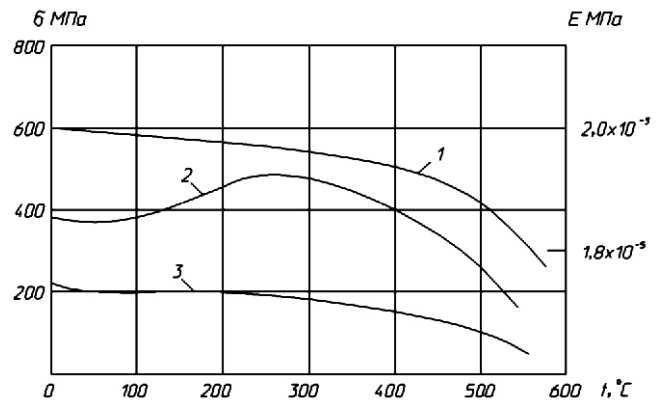


Рис. 4. Зависимость механических свойств малоуглеродистых сталей от температуры:

1 – модуль продольной деформации; 2 – предел прочности; 3 – предел текучести

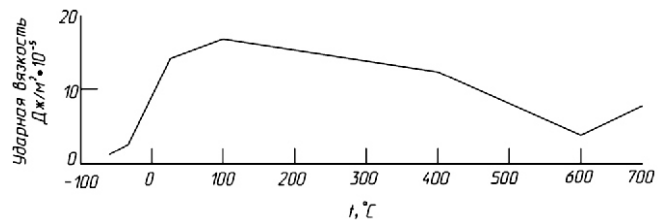


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости стали марки ВСтЗ от температуры

2) модуль деформации  $E$  уменьшается с повышением температуры;

3) показатели ударной вязкости снижаются при повышении температуры свыше 100 °С;

3) характеристики пластичности (относительное удлинение и сужение перед разрывом) вначале немного уменьшаются, а, начиная с 200–300 °С, резко увеличиваются.

Несколько иначе ведет себя сталь повышенной прочности марки 15ХСНД, которая больше приспособлена для работы при повышенных температурах. Исследования [5] показали, что основной металл и сварные соединения из этой стали при работе в интервале температуры 200–400 °С достаточно хорошо сохраняют свои прочностные и пластические характеристики и могут надежно противостоять эксплуатационному режиму при подобных температурах. Работа стали 15ХСНД в интервале температур 400–600 °С связана с незначительным снижением пределов текучести и прочности. Что касается относительного удлинения и ударной вяз-

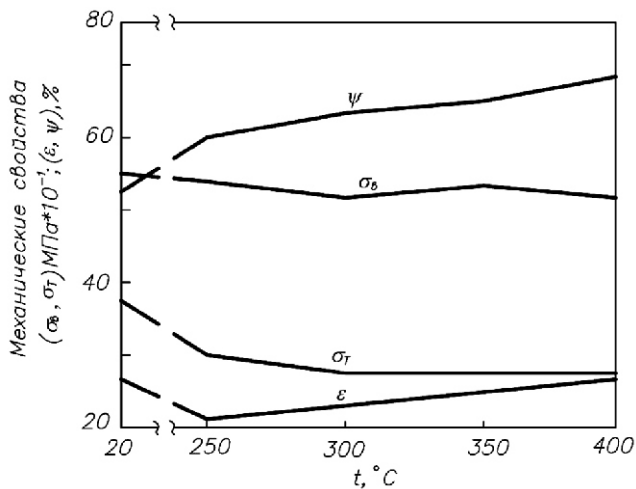


Рис. 6. Зависимость механических свойств стали марки 15XCHD от температуры

кости, то они под влиянием термического воздействия в интервале температур 400–600 °C изменяются мало.

В целом сталь марки 15XCHD характеризуется стабильностью прочностных и пластических показателей в интервале температур 200–400 °C (рис. 6). Аналогично ведет себя в конструкциях при повышенных температурах и сталь марки 10XCHD.

Отмеченные изменения свойств стали являются функцией абсолютных величин температур, воздействующих на конструкцию. Однако существенное влияние оказывает также продолжительность температурного воздействия и особенно его цикличность. При достаточно длительном воздействии температуры возможно появление тепловой ползучести. Оно связано с тем, что в процессе работы металлоконструкций при определенных величинах нагрузки и температуры в них возникают пластические деформации, которые с течением времени оказывают разрушающее влияние на сталь.

Проводимые в последние годы исследования показали, что воздействие высоких температур на сталь приводит к изменению ее структуры и повышению предела хладноломкости, вызывая т.н. тепловую хрупкость металла [1], с переходом при температурах 300...500 °C локальных зон металла сварных соединений кожуха в хрупкое состояние и снижением характеристик сопротивления хрупкому трещинообразованию [2].

Наращение деформаций может ограничить работу конструкций. Такие случаи встречаются

при перегревах кожухов шахт доменных печей, после чего часть кожуха, теряя устойчивость, превращается местами в гофрированную оболочку, что приводит к его осадкам, наклону и, соответственно, нарушениям в работе оборудования.

Переменное или внезапное воздействие температуры на конструкцию вызывает возникновение напряжений тепловой усталости, а при внезапных однократных изменениях с высоким градиентом – напряжений теплового удара. При этом резко снижаются пластические свойства стали, что может привести к хрупкому разрушению. Следует иметь в виду, что термическая усталость в отличие от механической характеризуется значительно меньшим числом циклов, относится к категории малоциклового усталости и может быть одной из причин повреждений кожуха и возникновения аварийных ситуаций.

Усталостные разрушения в конструкциях, нагруженных только термическими напряжениями, и в конструкциях, подвергаемых, кроме термического, механическому нагружению, происходят по-разному. Чем выше прочностные характеристики материала, тем меньшее влияние на число циклов изменения температур, приводящих к появлению трещин, оказывает механическая нагрузка.

Кожухи доменных печей в процессе эксплуатации в большинстве случаев подвергаются локальным температурным воздействиям. Перегрев кожуха доменной печи оказывает влияние на повышение максимальных растягивающих напряжений и интенсивности напряжений и нередко приводит к выпучиванию и трещинообразованию [2].

Исследования [4] показали, что локальный перегрев кожуха весьма опасен и вызывает появление сжимающих радиальных добавок к фоновым напряжениям, затухающим по мере удаления от центра теплового пятна. В зоне пятна добавки сжимающие, но за его пределами имеет место смена знака усилий.

Локальные температурные воздействия на кожух могут быть как длительными постоянными (сотни и тысячи часов), так и кратковременными повторяющимися (десятки минут). Имеющиеся данные свидетельствуют о разогреве отдельных зон кожуха до 300...600 °C. При длительных и повторяющихся температурных воздействиях в сварных соединениях кожухов раз-

виваються процеси охрупчівання металла, котрі при наявності двух- або трьохосного напруженого стану підвищують ризик хрупкого руйнування [2].

Аналіз залежності максимальних добовок до фонового напруженого стану от радіуса гарячого пляма показав, що з збільшенням цього радіуса вказані добошки монотонно зростають. При постійних умовах теплообміну більш високим фоновим температурам відповідає менший рівень добошок до фонового напруження.

Рівень температурних добошок до напруження значно падає з збільшенням товщини кожуха. Цей результат відображає особливості локального перегріву, а саме: збільшення товщини призводить до зростання втрат теплової енергії на теплопередачу в тангенціальному напрямку. При цьому, починаючи з певної товщини, інтенсивність зростання стає малою, а добошки до температур і напружень стабілізуються.

Таким чином, небезпека утворення хрупких тріщин в перегретій зоні зростає з збільшенням радіуса гарячого пляма і зменшенням товщини кожуха. При цьому слід мати на увазі, що нижній межу напружень, при ко-

тих розповсюдження тріщини неможливо, становить  $(3,5-5,6) \cdot 10^7$  Па, оскільки при цих напруженнях величини вивільнюваної потенціальної енергії недостатньо для розповсюдження тріщини.

Відомі випадки появи тріщин в місцях локальних перегрівів кожухів, особливо при їх циклічному впливі і наступному охолодженні зовнішнім поливом водою. Відзначається також значуще впливу термічних напружень, викликаних перепадом температур по товщині металу [9].

З наведеного очевидно, що в процесі тривалої експлуатації кожухів доменних печей деградація службових властивостей матеріалу, пов'язана з впливом високої температури, може призвести до тріщиноутворення, досягненню граничного стану і руйнуванню конструкцій.

Це свідчить про значуще впливу термічних впливів на матеріал кожухів доменних печей, їх промислову безпеку і про необхідність застосування для них сталі, забезпечуючої їх міцність і надійність в складних умовах впливу високих температур, що виходять за межі штатних значень.

- 
- [1] *Горицкий В.М.* Тепловая хрупкость стали. – М.: Металлургиздат, 2007. – 381 с.
- [2] *Востров В.К.* Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей и воздухонагревателей // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 11. – С. 40–43.
- [3] *Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е.* Металлургия чугуна. – К.: Вища школа, 1974. – 486 с.
- [4] *Медведев А.А., Любин А.Е., Шаломов Б.Я.* Исследование состояния кожуха воздухонагревателя в зоне местного перегрева // Проблемы прочности. – 1988. – № 3. – С. 118–119.
- [5] *Мельников Н.П.* Конструктивные формы и методы расчета ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1972. – 546 с.
- [6] *Металлические конструкции.* / Под общ. ред. Н.С. Стрелюцкого. – М.: Изд-во по стр-ву, 1960. – 776 с.
- [7] *Нагрузки и воздействия на здания и сооружения* / Под общ. ред. А.В. Перельмутера. – К.: Сталь, 2005. – 487 с.
- [8] *Расчет и конструирование трубопроводов.* Справ. пособие / Под ред. Б.В. Зверькова – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
- [9] *Сварные строительные конструкции:* Справ. издание // *Лобанов Л.М., Шимановский В.Н., Шимановский А.В. и др.* – В 3-х томах. – Т. 3. – К.: Изд-во «Сталь», 2003. – 680 с.
- [10] *Сорокин Л.А.* Работа конструкций доменных печей. – М.: Металлургия, 1976. – 352 с.
- [11] *Шапиро Г.А.* Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. – М-Л.: Госстройиздат, 1952. – 285 с.

Надійшла 24.12.2013 р. 