

Усредненные результаты содержания тяжелых металлов при выщелачивании из бетона на основе природного песка, мг/л

Модельная среда	Время отбора проб, сут			
	1	14	21	30
Марганец				
Вода	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,001	61,59 ± 6,590	0,01 ± 0,001
Буфер (рН = 4,8)	673,7 ± 70,2	630,0 ± 64,465	685,07 ± 75,254	165,16 ± 17,82
Медь				
Вода	0,01 ± 0,001	0,01 ± 0,001	0,22 ± 0,026	0,08 ± 0,007
Буфер (рН = 4,8)	0,01 ± 0,001	0,12 ± 0,013	0,08 ± 0,007	0,08 ± 0,007
Свинец				
Вода	0,09 ± 0,009	0,77 ± 0,082	0,34 ± 0,034	1 ± 0,113
Буфер (рН = 4,8)	0,01 ± 0,001	1,77 ± 0,168	1,57 ± 0,103	0,28 ± 0,050
Кадмий				
Вода	0,03 ± 0,003	0,03 ± 0,003	0,024 ± 0,003	0,03 ± 0,003
Буфер (рН = 4,8)	0,03 ± 0,003	0,03 ± 0,003	0,03 ± 0,003	0,06 ± 0,008

Коэффициент вариации находится в пределах 10 – 20 %.

Таким образом, использование гранулированного шлака силикомарганца и доменного гранулированного шлака экономически и экологически целесообразно, т. к. позволяет уменьшить использование природных материалов, а увеличением использования отходов промышленности – уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Выводы. Использование гранулированных шлаков как вторичных материальных ресурсов решает ряд важных народнохозяйственных задач, таких как экономия природного сырья, предотвращение загрязнения водоемов, почвы и атмосферы, а также позволяет увеличить объемы производства строительных материалов и изделий. Кроме того, себестоимость строительных материалов, которые изготовлены с использованием гранулированных шлаков, меньше, чем традиционных.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Дворкин Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности : учеб.-справ. пособ. / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2007. – 368 с.
2. Металлургические шлаки в строительстве : для науч. работников, инженеров и студентов высших тех. учеб. заведений. / [В. И. Большаков, В. З. Борисовский, В. Д. Глуховский и др.]. – Д., 1999. – 114 с.
3. Напрямки і перспективи використання відходів металургійної, гірничорудної та хімічної промисловості в будівництві. / [В. І. Большаков, Г. М. Бондаренко, А. І. Головка та ін.]. – Д. : Gaudeamus, 2000. – 140 с.
4. Никопольские ферросплавы / [М. И. Гасик, В. С. Куцин, Е. В. Лапин и др.]. – Д. : Системные технологии, 2004. – 272 с.

УДК 669.01:539.4;539.2

РОЛЬ ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ В ОЦЕНКЕ КОНСТРУКЦИОННОГО КАЧЕСТВА СТАЛЕЙ

Ю. Я. Мешков, д. т. н., член.-корр. НАНУ, С. А. Котречко, д. ф.-м. н., А. В. Шиян, к. ф.-м. н.
Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев

Ключевые слова: прочность, механическая стабильность, охрупчиваемость, стабильность прочности, конструкционное качество

Введение. Основным признаком пригодности стали для использования ее в конструкции есть качество этой стали, заключенное в комплексе ее важнейших механических

характеристик. При этом в основе суждения о качестве конструкционной стали так или иначе лежит степень ее защищенности от хрупкости, в первую очередь, за счет рационального использования свойства прочности.

Анализ публикаций. Прочность является основным (базовым) механическим свойством любого конструкционного материала. Для конструкционных сталей и сплавов она определяется стандартными показателями условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ или предела прочности σ_B , но для обеспечения надежности при использовании данного материала в конструкции к имеющейся характеристике прочности обязательно прилагаются дополнительные механические характеристики – пластичности ψ_K (относительное поперечное сужение при разрыве образца), δ_p (относительное равномерное удлинение при разрыве), ударной вязкости (удельная работа при разрушении образца с регламентированным надрезом, KCV или KCU), трещиностойкости K_{IC} и др. [1 – 3]. Все указанные дополнительные характеристики, так или иначе, отражают одно важнейшее свойство испытываемого металла – его сопротивляемость к переходу из пластичного состояния в хрупкое или, другими словами, свойство «охрупчиваемости» металла. Однако каких-либо физически обоснованных нормативов достаточности показателей свойств пластичности или вязкости для заданной прочности металла применительно к конкретной конструкции и условиям ее эксплуатации в нынешней инженерной практике пока не выработано, а существующие нормативы основаны на сугубо эмпирическом и статистическом опыте.

Между тем, в ряду механических характеристик сталей свойство прочности занимает особое, ключевое место, однако роль этого свойства с точки зрения его влияния на хрупкость и конструкционное качество металла пока явно недооценивается. То, что с ростом прочности металлических сплавов опасность хрупкого разрушения нарастает, – общеизвестный факт, но проблема состоит в том, что необходимо указать характеристику, которая отражает степень этой опасности в определенной количественной мере.

Цель статьи. Показать ведущую роль свойства прочности в общем комплексе механических характеристик конструкционной стали, которое, в сочетании с характеристикой механической стабильности, определяет конструкционное качество металла.

Постановка задачи. Прочность, как и другие механические свойства металла, сильно зависит от природы сплава, его состава, структуры (термообработки) и внешних факторов воздействия (температуры, скорости нагружения, вида напряженного состояния). Исследование влияния внешних факторов на прочность особенно интересно в том смысле, что в этом случае мы имеем дело с изменением механического поведения (свойств) металла с данной фиксированной структурой и, поэтому, имеется возможность в спектре возможных уровней прочности выделить некоторую базовую характеристику, отражающую лишь вклад структурной «атермической» составляющей и лишенную влияния всех внешних факторов. Примером такой базовой характеристики может быть, например, прочность при низких (криогенных) температурах и квазистатической скорости нагружения при одноосном растяжении. Эту характеристику прочности можно считать исходной и только структурно-детерминированной, в отличие от текущей прочности, изменяющейся под влиянием различных факторов внешнего воздействия, например, таких как температура, динамика нагружения и жесткость напряженного состояния.

Как правило, для большинства конструкционных сплавов низкотемпературная «структурная» или «атермическая» часть прочности практически совсем или весьма существенно лишена пластичности и поэтому проявляет себя, как вполне или почти «хрупкая» прочность. Но с повышением температуры испытания прочность снижается, а пластичность нарастает (рис. 1) и это придает прочности некое специфическое свойство, которое можно назвать **стабильностью прочности**. Стабильность прочности означает, что с достижением предела текучести $\sigma_{0,2}$ (или любого другого выбранного рубежа прочности, например, σ_B) деформирование образца продолжается, идет пластическое формоизменение и упрочнение вплоть до достижения предельного напряжения разрушения S_K при конечной пластической деформации ψ_K . По мере снижения температуры от комнатной T_K до критической вязко-хрупкого перехода T_{ex} прочность стали постепенно теряет признак стабильности (в виде

снижения пластичности ψ_K) и, в конечном счете, при условии $\sigma_{0,2} \approx S_K$ (или $\sigma_B \approx S_K$), где $\psi_K \rightarrow 0$, прочность $\sigma_{0,2}^*$ становится нестабильной, или прочностью хрупкого состояния, которую можно назвать хрупкой прочностью R_X .

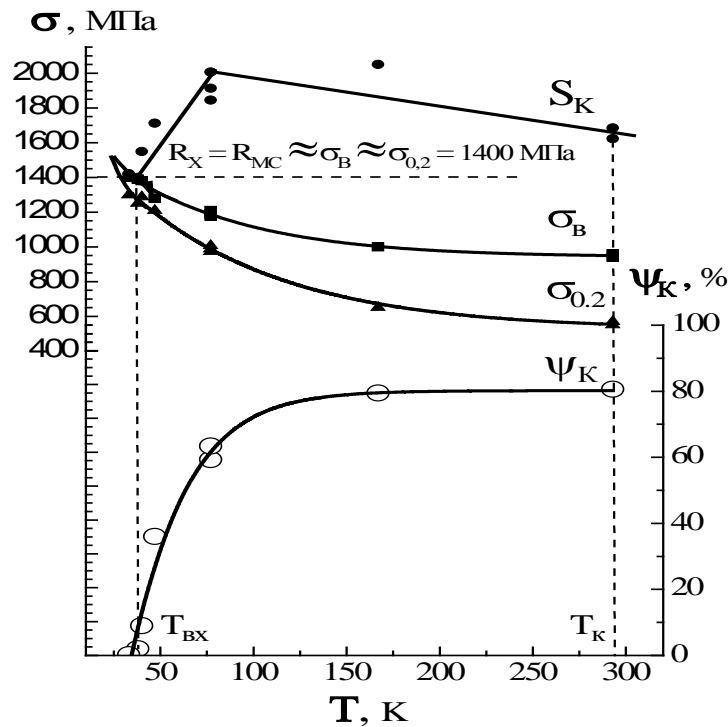


Рис. 1. Температурные зависимости механических характеристик конструкционной стали 15X2HMΦA для определения хрупкой прочности R_X

Заметим, что хрупкая прочность R_X является наибольшим значением стабильной прочности $\sigma_{0,2}^*$ и наименьшим значением нестабильной, но по своей сути R_X – это именно та, упомянутая выше, исходная (базовая) структурно-детерминированная прочность, которая задается только составом и структурным состоянием металла. Эта хрупкая прочность R_X , являясь наибольшей стабильной прочностью, может рассматриваться как особая **предельная** прочность, т. к. представляет собой точку перехода от предельной нестабильной прочности хрупкого разрушения (ниже R_X на температурной кривой прочности) и участка стабильной прочности $\sigma_{0,2}$ в температурном интервале пластического поведения металла. Весь интервал стабильного поведения свойства прочности $\sigma_{0,2}$ (при комнатной температуре T_K) до R_X (при температуре вязко-хрупкого перехода T_{BX}) является интервалом механической стабильности металла (см. рис. 1).

Механическая стабильность, как важнейший признак свойства прочности, принципиально дополняет характеристику прочности с точки зрения оценки степени подверженности металла угрозе его охрупчивания под воздействием всех внешних факторов влияния на прочность – температуры, динамики, вида напряженного состояния и др.

Механическая стабильность металла. В качестве конкретной количественной меры такого свойства прочности как механическая стабильность в работах [4; 5] было предложено использовать «коэффициент механической стабильности» K_{ms} :

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_2}, \quad (1)$$

где R_{MC} – хрупкая прочность (сопротивление микросколу) как минимальная прочность разрушения при критической степени деформации $e_c \approx 2\%$ в области криогенных температур [5]; σ_2 – стабильная прочность стали на стадии критической деформации $e_c \approx 2\%$ в диапазоне температур от T_k до T_{ex} .

Из (1) видно, что при неизменной структуре ($R_{MC} = const$) изменение прочности за счет температурнозависимой составляющей прочности σ_2 в пределах, где $\sigma_2 < R_{MC}$, механическая стабильность этой стали остается $K_{ms} > 1$, что означает безусловное проявление определенной пластичности ($\psi_K > 2\%$) в момент разрушения при разрыве. Но принципиальное преимущество показателя K_{ms} перед другими показателями пластичности (ψ_K) или вязкости (KCV, KCU) заключается в том, что характеристика K_{ms} пригодна для анализа условий пластического поведения стали и в общем случае сложного напряженного состояния, где достаточно учесть механическое повышение прочности металла в зонах стесненной текучести по законам механики напряженного состояния [6]. Именно поэтому параметр K_{ms} оказывается пригодным для расчетного прогнозирования критической температуры хрупкости T_c образцов с надрезом или трещиной [7].

Таким образом, прочность металла ($\sigma_{0,2}$ и σ_2) является главным, ключевым механическим свойством, которое в сочетании с характеристикой механической стабильности K_{ms} полностью контролирует склонность к охрупчиванию (охрупчиваемость стали). При этом иные показатели (ψ_K , KCV и др.) играют лишь иллюстративную (косвенную), но не определяющую роль в возможности проявления хрупкости металла.

Прочность, стабильность и качество конструкционной стали. Модельное физически обоснованное на субмикроскопическом уровне представление о механической стабильности металлов в процессе их пластической деформации подробно приводится в работах [4; 5] и здесь не рассматривается. Можно лишь подчеркнуть, что для выработки полезного для инженерной практики наглядного представления об одном из ключевых показателей свойств металлов, имеющих прямое отношение к проблеме конструкционной хрупкости металлов («охрупчиваемости») нет необходимости углубляться во внутреннюю микроструктурную природу механических явлений деформируемого металла, а достаточно лишь расширить подход к рассмотрению макроскопического свойства прочности ($\sigma_{0,2}$), дополнив его введением понятия стабильности прочности.

Главный смысл увеличения прочности стали в технике заключается в снижении веса конструкции. Однако на практике экономия веса строительной конструкции далеко не всегда пропорциональна росту прочности $\sigma_{0,2}$ (рис. 2) [8].

Как видно из рисунка 2, замедление темпа роста в экономии веса конструкции от темпа роста прочности $\sigma_{0,2}$ обусловлено увеличением риска охрупчивания высокопрочной стали в конструкции, а также с вынужденным повышением коэффициентов запаса прочности. Таким образом, очевидно ощутимое снижение конструкционного качества прочности группы высокопрочных сталей с $\sigma_{0,2} = 500 - 1000$ МПа в сравнении с группой сталей средней и низкой прочности $\sigma_{0,2} < 500$ МПа. Это снижение конструкционного качества прочности $\sigma_{0,2}$ проявляется в том, что в пределах разбега прочностей в первой группе сталей экономия веса конструкций составляет $\sim 75 - 50 \approx 25\%$, а во второй группе сталей средней и низкой прочности $\sim 50 - 0 \approx 50\%$. Следовательно, относительная эффективность снижения металлоемкости конструкции (относительный прирост снижения веса Δm , % на относительный прирост прочности $\Delta \sigma$, МПа) у сталей с прочностью $\sigma_{0,2} < 500$ МПа в 2 раза

выше, чем у высокопрочных сталей, например, **конструктивное качество прочности** на уровне $\sigma_{0,2} \approx 400$ МПа выше, чем у прочности $\sigma_{0,2} \approx 800$ МПа.

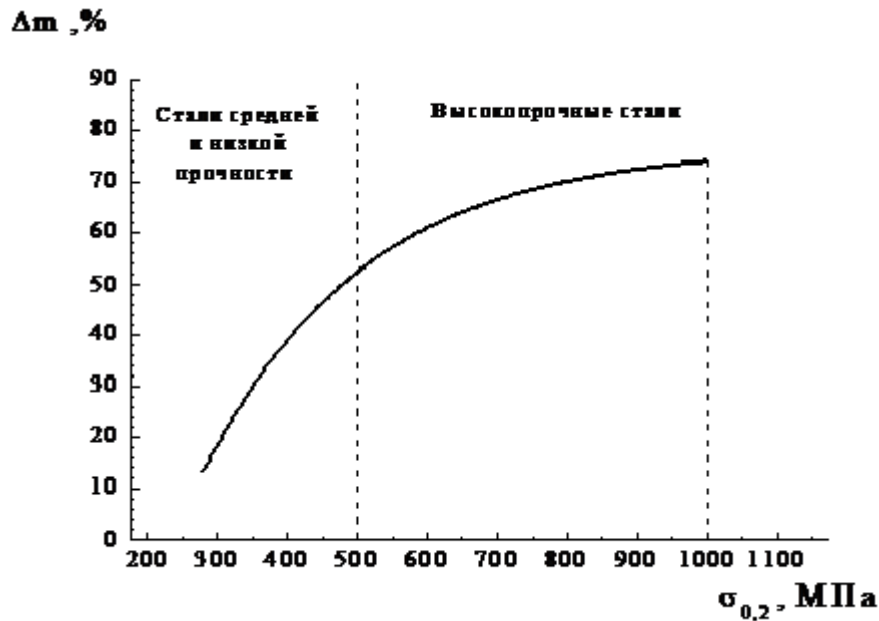


Рис. 2. Зависимость изменения показателя относительного снижения веса конструкции Δm от прочности конструкционной стали $\sigma_{0,2}$ [8]

Причина снижения металлоемкости с ростом прочности $\sigma_{0,2}$ видна из рисунках 3, где представлено уменьшение характеристики K_{ms} с ростом $\sigma_{0,2}$ [4; 5].

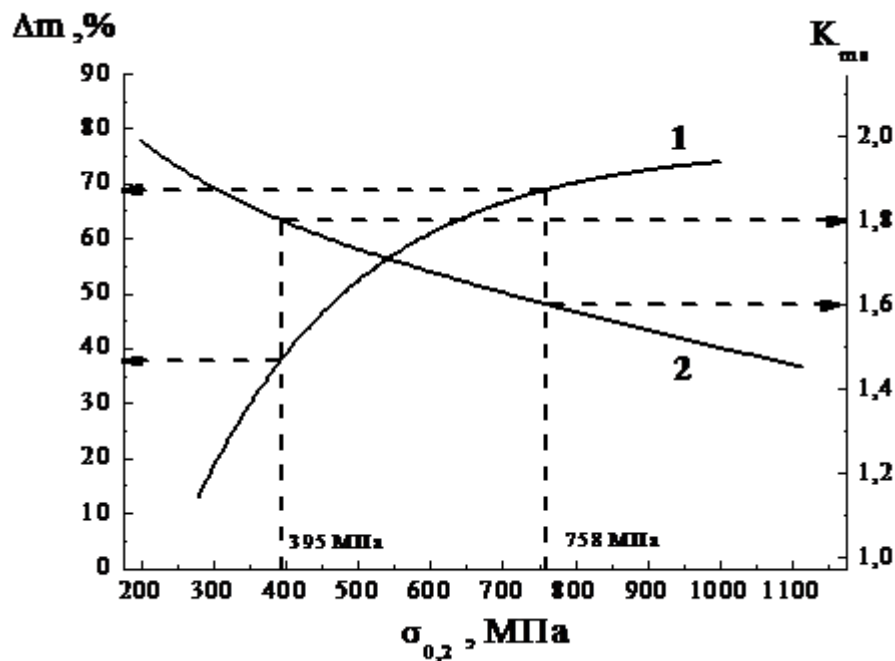


Рис. 3. Зависимости изменения показателя относительного снижения веса конструкции Δm [8] (кривая 1) и характеристики механической стабильности K_{ms} от прочности конструкционной стали $\sigma_{0,2}$ (аппроксимация экспериментальных данных [4; 5] – кривая 2)

Как видно из рисунка 3, конструкционное качество прочности, отражаемое величиной K_{ms} , снижается по мере увеличения прочности $\sigma_{0,2}$. Оценка показывает, что при переходе от прочности $\sigma_{0,2} = 395$ МПа к $\sigma_{0,2} = 758$ МПа, величина K_{ms} , соответственно, снижается от значения $K_{ms} = 1,8$ до значения $K_{ms} = 1,6$, (см. рис. 3), т. е. всего на 11 %, что обуславливает относительную потерю ожидаемого выигрыша в весе изделия на 45 % (от 69 до 38 %). Это сравнение показывает, насколько важным фактором в инженерной практике является понятие конструкционной стабильности (механической стабильности) характеристики прочности, привязанное к ее конкретному уровню $\sigma_{0,2}$ или σ_2 . Таким образом, при оценке прочности каждого металлического материала наряду с ее величиной $\sigma_{0,2}$ (или σ_2) должна присутствовать качественная сторона этой прочности, отражающая ее конструкционную ценность по величине K_{ms} .

На рисунке 4 дополнительно приведена кривая изменения оптимальных значений характеристики механической стабильности K_{ms}^{opt} от увеличения прочности $\sigma_{0,2}$ [9]. Величина K_{ms}^{opt} отражает наиболее высокие (оптимизированные для любых сочетаний свойств пластичности ψ_K , прочности $\sigma_{0,2}$ и механической стабильности K_{ms}) из всех возможных значений K_{ms} при заданном уровне прочности $\sigma_{0,2}$ для конструкционных сталей и сплавов всех классов прочности и характеризует наивысшее качество металла [10]. Это означает, что для строительных сталей еще имеется неиспользованный резерв повышения их K_{ms} до уровня K_{ms}^{opt} и, соответственно, для перевода их из разряда малоэффективных к высокоэффективным в части выигрыша в металлоемкости при увеличении прочности (см. рис. 4). Препятствием здесь могут стать лишь обстоятельства чисто технологического и экономического порядка, но инженерные предпосылки для такого пути снижения металлоемкости конструкций здесь вполне очевидны.

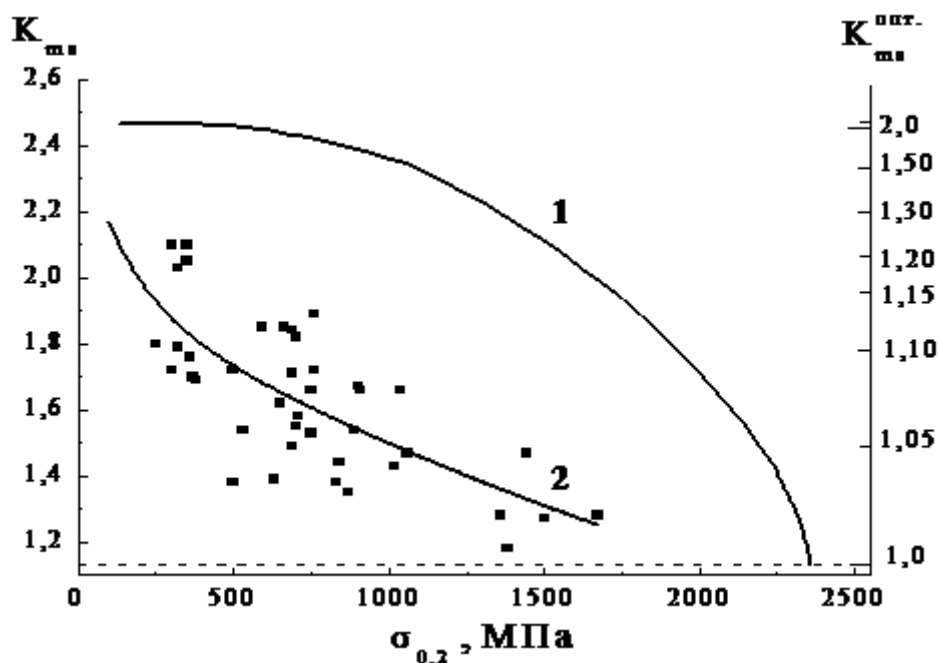


Рис. 4. Зависимости изменения оптимального значения характеристики механической стабильности K_{ms}^{opt} (кривая 1) и K_{ms} типичных конструкционных сталей от прочности конструкционной стали $\sigma_{0,2}$ (аппроксимация экспериментальных данных [4; 5] – кривая 2);

■ – экспериментальные данные для сталей с различными уровнями прочности

На рисунке 4 приводится общая картина зависимости K_{ms}^{onm} от прочности сталей [9, 10], где видно, что с увеличением прочности ее конструкционное качество обречено на неизбежное падение, особенно в интервале $\sigma_{0,2} > 1\ 000 - 1\ 500$ МПа так, что для строительных сталей перспективы на такой класс прочности быть не может. Выше по прочности могут быть инструментальные и другие виды сталей, для которых механическая стабильность не столь актуальна, поэтому значения даже оптимальной механической стабильности K_{ms}^{onm} здесь опускаются до минимально приемлемых уровней ($\sim 1,1 - 1,2$).

Выводы. 1. В общем комплексе механических характеристик конструкционных сталей ведущая роль принадлежит свойству прочности ($\sigma_{0,2}$, σ_2 , σ_B), которое в сочетании с дополнительной характеристикой механической стабильности K_{ms} определяет то конечное свойство, которое можно назвать «конструкционным качеством» стали с данным уровнем прочности $\sigma_{0,2}$.

2. С ростом показателя прочности за счет изменения состава и структуры стали конструкционное качество стали, дополнительно отражаемое ее механической стабильностью K_{ms} , неизбежно понижается, что сопровождается потерей темпа роста экономии металла за счет его упрочнения. Это неизбежно приводит к вопросу о пределах экономической и технологической целесообразности применения высокопрочных или особо высокопрочных сталей в строительстве уникальных сооружений.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
2. **Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В.** Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей // Проблемы прочности, 2010. – № 1. – С. 112 – 119.
3. **Броек Д.** Основы механики разрушения. – М. : Высш. шк., 1980. – 368 с.
4. **Котречко С. А., Мешков Ю. Я.** Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции – К. : Наук. думка, 2008. – 295 с.
5. **Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В.** Механическая стабильность – универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла // Успехи физики металлов, 2009. – Т. 10. – № 2. – С. 207 – 228.
6. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособ. / Под ред. В. В. Панасюка. – К. : Наук. думка, 1988. – № 3. – 436 с.
7. **Мешков Ю. Я., Котречко С. А., Шиян А. В., Стеценко Н. Н., Сорока Е. Ф.** Роль характеристик міцності в оцінці конструкційної якості сталей і сплавів // А.с. України № 41447 – 2011. Авторське право і суміжні права. – 2011. – № 26.
8. **Морозов Ю. Д.** Микролегирующие как путь повышения механических и технологических свойств строительных сталей // Металлознавство та термічна обробка металів, 2001. – № 3 (14). – С. 21 – 37.
9. **Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Стеценко Н. Н.** Оптимизация свойств пластичности, прочности и механической стабильности сталей и сплавов в виде обобщенной диаграммы // А. с. України № 39291 – 2011. Авторське право і суміжні права. – 2011. – № 25.
10. **Шиян А. В., Котречко С. О., Мешков Ю. Я., Стеценко Н. М., Большаков В. І., Носенко О. П.** Спосіб оцінки якості конструкційної сталі // Патент України № 66341 – 2011. Промислова власність. – 2011. – № 24.