

Оценка эксплуатационной надежности листовых упругопластических материалов по параметрам твердости

Н. Р. Музыка, В. П. Ламашевский

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Предложен новый метод оценки эксплуатационной надежности листовых металлических материалов с трещиной по параметрам твердости. Показано, что состояние материала в зоне предразрушения одноосно нагруженного образца, находящегося под действием напряжения, близкого к пределу прочности материала, соответствует состоянию поврежденного материала в зоне вершины трещины перед ее страгиванием.

Ключевые слова: эксплуатационная надежность, листовый материал, статическое растяжение, твердость, коэффициент гомогенности, вершина трещины, вязкость разрушения, пластическая зона.

Введение. Прогноз эксплуатационной надежности материала конструктивных элементов в виде пластин с концентраторами напряжений типа трещин, подвергнутых статическому растяжению, проводится с помощью силовых, деформационных или энергетических критериев механики разрушения [1].

Методы определения характеристик вязкости разрушения являются достаточно сложными и трудоемкими [2], а при работе материала в упругопластической области деформирования часто недостаточно информативными.

Известны более простые нестандартные методы оценки вязкости разрушения материалов, базирующиеся на установлении получаемых при испытаниях образцов на одноосное растяжение корреляционных связей между отдельными физико-механическими [3] характеристиками или при их сочетании в различном виде [4, 5] и параметрами трещиностойкости. В [6] была установлена связь между значениями вязкости разрушения и параметрами, характеризующими степень поврежденности конструкционного материала.

Оценка вязкости разрушения материала по результатам стандартных механических испытаний является достаточно трудоемкой и требует решения сложных методических вопросов [7].

Актуальным представляется разработка менее трудоемкого, достоверного и надежного для практического применения метода оценки эксплуатационной надежности листовых материалов без привлечения параметров вязкости разрушения.

Обоснование метода. Одним из подходов к изучению распространения трещины в конструктивном элементе является учет влияния так называемых “напряжений на бесконечности”. Однако этот подход не позволяет сопоставлять между собой данные экспериментальных исследований, выполненных на образцах различных типов, и тем более использовать их для оценки несущей способности конструктивных элементов. В этом случае рекомендуется учитывать влияние местных напряжений у кончика трещины, определяемых по несущей способности испытуемых образцов.

При обработке результатов испытаний тонких пластин с трещиной используют известную модель Дагдейла, в соответствии с которой при упругопластическом деформировании испытуемого объекта длину реальной трещины условно увеличивают на размер пластической зоны, нагружая берега виртуальной трещины нормальными напряжениями, равными пределу текучести материала. В [8] рассматривается модифицированная модель, в которой, в отличие от предыдущей, учитывается дефор-

мационное упрочнение материала. При этом полагают, что в состоянии предельного равновесия в узких упругопластических зонах в направлении распространения трещины (зоны активной пластической деформации и активной повреждаемости деформируемого металла от $-a$ до $-l$ и от a до l (рис. 1)), формирующихся в тонкой пластине в области вершины трещины, действуют нормальные напряжения, которые в момент страгивания последней линейно изменяются от предела прочности в устье трещины до предела текучести на границе пластической зоны, т.е. аппроксимируются линейным участком AB условной полной диаграммы деформирования (рис. 2).

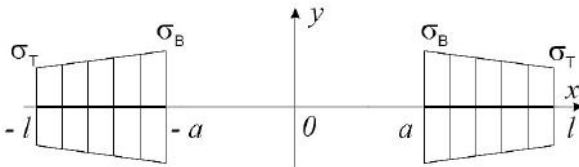


Рис. 1

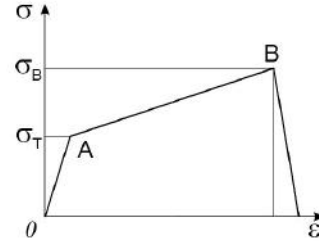


Рис. 2

Рис. 1. Распределение напряжений в устье трещины в соответствии с принятой моделью.
Рис. 2. Полная диаграмма деформирования образца при растяжении.

За пределами этой зоны в тонкой пластине действуют напряжения, не превышающие значения предела упругости металла.

Процесс образования шейки при деформировании тонкой пластины с трещиной из пластичного материала (потеря устойчивости пластического деформирования) протекает непрерывно по мере ее продвижения в предварительно деформированном металле и представляется в виде “ручейка”, бегущего в направлении распространения таковой [9]. Разрушение листовых пластичных бездефектных материалов под действием внешней нагрузки происходит вследствие предварительного накопления в опасном сечении определенного уровня повреждений, после чего они перестают сопротивляться действующему напряжению. Аналогичная картина имеет место и в зоне трещины, где структура материала подобна структуре без нарушения целостности перед разрушением. Сходство этих структур по уровню поврежденности позволяет моделировать структурное состояние материала в зоне активной поврежденности в окрестности (окрестность вершины трещины в момент ее старта) структурным состоянием в опасном сечении стандартного образца при одноосном растяжении.

Согласно данной модели трещина страгивается и развивается, если уровень напряжений в ее вершине достигает предела прочности. Этому соответствует предельный уровень накопленных повреждений, при этом материал существенно разрыхляется [10], что способствует старту и развитию трещины. Для каждого материала характерно свое состояние поврежденности структуры перед началом разрушения. Подобие структурных состояний тонколистового материала в устье трещины и в момент потери устойчивости пластического деформирования образца при одноосном растяжении (образование шейки) подтверждается установленной ранее одинаковой пористостью металла у острия надреза при одноосном нагружении образца и на изломе в шейке при растяжении полосы [11], взаимосвязью характера распределения напряжений у вершины трещины и кинетикой накопления повреждений (ниспадающий участок диаграммы деформирования при одноосном растяжении образца) [12], возможностью оценки трещиностойкости материала по характеристикам механических свойств и ширине пластической зоны [13], а также прогно-

зированием влияния трещиноподобного дефекта на величину предельной нагрузки реального конструктивного элемента при двухосном растяжении [14]. Об адекватности уровня поврежденности материала в пластической зоне в области устья трещины и в пределах шейки одноосно растягиваемого образца свидетельствуют результаты измерений микротвердости [15].

В континуальной механике повреждаемости для оценки деградации материала принимается параметр, характеризующий плотность микротрещин, микропор и других дефектов в опасном сечении. Однако в настоящее время практически не существует доступной и надежной методики определения этого параметра и тем более его предельного значения для конкретного материала.

Ниже рассматривается новый подход к прогнозированию эксплуатационной надежности листовых материалов, базирующийся на оценке их способности к накоплению рассеянных повреждений в процессе механического нагружения. В основу этого подхода положен простой метод твердости, используемый для оценки вязкости разрушения металла по характеристикам статической твердости [16], микротвердости [17], параметрам индентирования синтетическим алмазом [18] или жестким индентором [19] и др.

Кинетика разрушения материала в зоне активной повреждаемости в окрестности трещины обусловлена начальной неоднородностью структуры [20–23] и ее неоднородностью непосредственно в окрестности концентратора – трещины [3, 4, 9, 24, 25], от которых зависит процесс разрыхления [10, 26, 27]. Однако методы оценки этого состояния четко не определены [28]. Например, в [29] предлагается вязкость разрушения материала оценивать по результатам измерения микротвердости в зоне вершины трещины, что обусловлено существенными методическими трудностями, недостаточной чувствительностью метода к трансформациям структуры и, как следствие, плохой корреляцией определяемых характеристик микротвердости с уровнем повреждаемости материала.

При внешних воздействиях изменяемыми параметрами структуры материала в зоне активной повреждаемости являются форма и размеры зерен, включения избыточных фаз, количество пор, расстояние между ними и др.

Возможность моделирования структурного состояния материала в зоне активной повреждаемости в окрестности вершины трещины его состоянием в рабочей части образца, испытываемого на одноосное растяжение, позволяет эксплуатационную надежность пластичных листовых материалов оценивать на основе метода LM-твердости [30] с помощью коэффициента гомогенности материала Вейбулла m без использования критерия вязкости разрушения.

Известно, что в рабочей части испытываемого на растяжение образца и в примыкающем к вершине трещины материале конструктивного элемента в момент ее страгивания поры и другие разного рода несплошности максимально раскрыты. С учетом этого, а также того, что трещина стартует в зону поврежденного материала, предлагается определять два параметра гомогенности структуры: m_1 – характеризует материал в исходном (ненагруженном) состоянии и является показателем его качества; m_2 – определяется для данного материала под нагрузкой при напряжении, близком к пределу прочности. Этот параметр в какой-то мере служит показателем надежности тонколистового конструктивного элемента на стадии изготовления.

Особенность метода LM-твердости состоит в том, что при определении уровня поврежденности материала не требуется устанавливать причины трансформации структуры, вызывающие его деградацию. Не менее важным при этом является независимость параметра m от метода измерения твердости.

Испытание на одноосное растяжение по предлагаемому методу двух последовательно расположенных в захватах испытательного устройства идентичных образцов аттестуемого материала, как правило, не приводит к их одновременному разруше-

нию. Это обусловлено различным уровнем поврежденности их исходной структуры вследствие влияния технологических факторов.

По достижении напряжения, равного пределу прочности материала, один из образцов разрушается, а неразрушенный образец повторно нагружается до предельного уровня напряжения разрушенного образца, и в этом состоянии методом ЛМ-твёрдости определяется параметр m_2 [31].

Для сравнительной оценки эксплуатационной надежности различных материалов кроме характеристик гомогенности используются параметры k_1 и k_2 . Параметр k_1 характеризует интенсивность накопления повреждений в материале вследствие наработки и определяется как отношение $m_1 - m_2$ к текущему значению коэффициента гомогенности m_2 :

$$k_1 = (m_1 - m_2)/m_2. \quad (1)$$

Этот параметр является более показательной характеристикой интенсивности накопления повреждений в материале по сравнению с параметром k'_1 :

$$k'_1 = (m_1 - m_2)/m_1. \quad (2)$$

В качестве критерия оценки эксплуатационной надежности листового материала при статическом растяжении принимается параметр k_2 :

$$k_2 = m_1/m_2, \quad (3)$$

характеризующий меру поврежденности материала при деформировании по сравнению с его исходным состоянием. Чем больше в материале структурных дефектов, тем больше значение параметра k_2 .

Таким образом, сравнение рассчитанных для конкурирующих листовых материалов значений коэффициентов гомогенности Вейбулла m_2 с параметрами k_1 , k_2 позволяет определить тот материал, который более надежный в данных условиях эксплуатации.

Результаты исследования. Для апробации предлагаемой методики оценки эксплуатационной надежности листовых конструкционных материалов использовались изготовленные в соответствии со стандартом [30] геометрически подобные образцы листовых материалов толщиной 2 мм из углеродистых ферритно-перлитных сталей 25 и 45 и низколегированной стали 0Н9 со структурой мелкодисперсного феррита с участками остаточного аустенита (таблица).

Механические характеристики исследуемых сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_B/\sigma_{0,2}$	δ , %
25	250	520	2,08	26
45	360	630	1,75	15
0Н9	780	890	1,14	28

Установленные в захватах испытательной установки два последовательно соединенных образца одного материала подвергали одноосному растяжению [32] до разрушения одного из них. С помощью портативного прибора COMPUTEST SC фирмы ERNST (Швейцария), обеспечивающего автоматическую регистрацию, измеряли твердость материала образца в исходном состоянии и неразрушенного образца в нагру-

женном состоянии при напряжении, соответствующем пределу прочности материала разрушенного образца.

Значения коэффициентов гомогенности m_1 (исходное состояние) и m_2 (состояние по достижении предельной равномерной деформации ε_B предварительно разрушенного образца) для стали 25 соответственно составляли: $m_1 = 36$, $m_2 = 12$, $\varepsilon = 20\%$; для стали 45 – $m_1 = 68$, $m_2 = 30$, $\varepsilon = 15\%$; для стали 0Н9 – $m_1 = 70$, $m_2 = 42$, $\varepsilon = 9\%$.

Более высокие значения коэффициента m свидетельствуют о низком уровне рассеяния значений твердости, о лучшем состоянии структуры и сопротивляемости разрушению. Коэффициент m отражает состояние структуры материала. С увеличением повреждаемости материала этот коэффициент уменьшается.

Рис. 3 иллюстрирует кинетику накопления повреждений в исследуемых материалах в оценке коэффициентом гомогенности m разрушенных и неразрушенных образцов, подвергаемых одноосному растяжению.

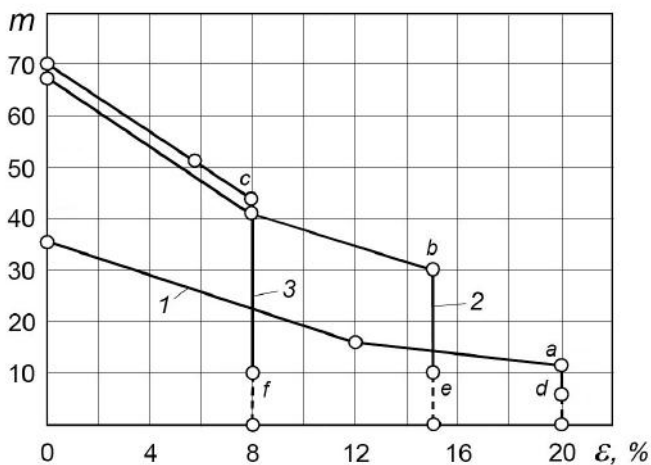


Рис. 3. Кинетика накопления повреждений в сталях 25 (1), 45 (2) и 0Н9 (3).

Как отмечалось выше, неразрушенные образцы при измерениях твердости находились под действием растягивающего напряжения, приблизительно равного пределу прочности разрушенного образца. На рис. 3 точки a, b и c соответствуют значениям коэффициента гомогенности m , рассчитанным по результатам 25 измерений твердости на рабочей части разрушенных образцов в областях, расположенных в непосредственной близости к плоскости раздела, т.е. в области несколько менее поврежденного материала, где можно корректно измерить твердость, точки d, e, f – значениям коэффициента гомогенности в рабочей части неразрушенных образцов, находящихся под действием напряжения, приблизительно равного пределу прочности материала. Там же штрихом обозначены участки массовых измерений твердости в рабочей части образцов при предельной деформации в момент разрушения, когда количество пор, микротрещин и других дефектов настолько велико, что коэффициент гомогенности $m \rightarrow 0$. С учетом этого обстоятельства и приведенных на рис. 3 данных можно заключить, что кинетика поврежденности материалов при деформировании более качественно описывается результатами измерений твердости металла в напряженном состоянии.

Для оценки эксплуатационной надежности материала пластины по методике испытаний дисковидных образцов [8] определяли характеристику вязкости разрушения. Для этого в центре рабочей части дисковидных образцов в направлении прокатки выполняли прямолинейный сквозной надрез длиной $2l_0 = 10$ мм с радиусом y

вершины 0,003 мм. В качестве характеристики вязкости разрушения принимался коэффициент интенсивности напряжений $K_{стр}$, определяемый по исходной длине l_0 трещины и напряжению срагивания трещины $\sigma_{стр}$: $K_{стр} = \sigma_{стр} \sqrt{\pi l_0 f_1 f_2}$, где f_1 и f_2 – поправочные множители, учитывающие соответственно влияние граничных условий на напряженное состояние в вершине трещины и особенности (форма и размеры) концентратора [3]. Параметр $K_{стр}$ является хорошей характеристикой, позволяющей выбрать лучший листовый материал с точки зрения обеспечения эксплуатационной надежности в данных условиях работы.

Результаты экспериментального определения различных показателей эксплуатационной надежности исследуемых материалов представлены на рис. 4.

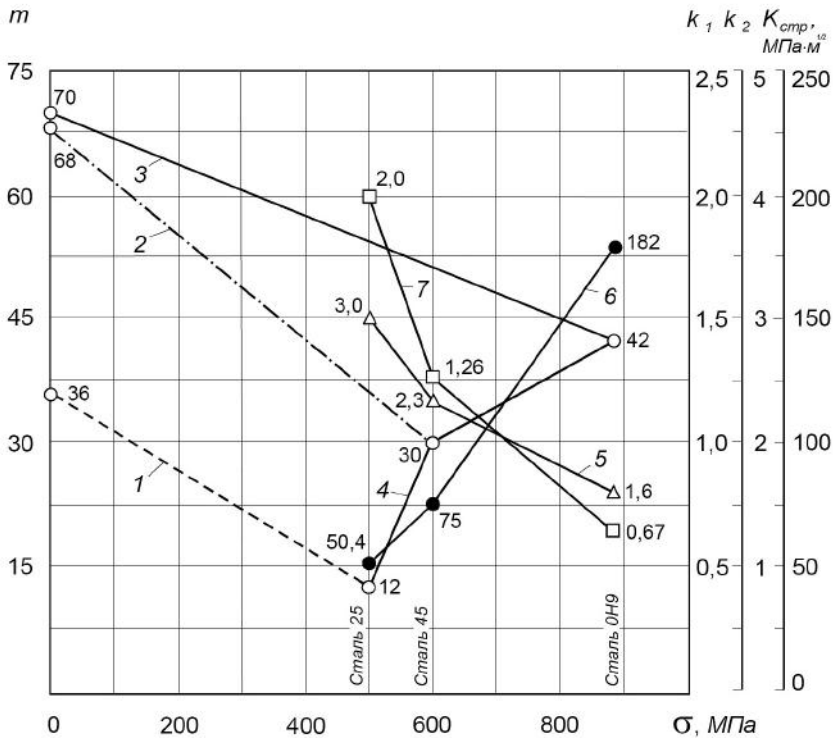


Рис. 4. Сравнительная оценка работоспособности исследуемых сталей 25 (1), 45 (2) и 0Н9 (3) по коэффициенту гомогенности m , по предельной повреждаемости материалов (4), по интенсивности накопления повреждений k_1 (5), по вязкости разрушения $K_{стр}$ (6), по показателю эксплуатационной надежности k_2 (7). (Цифрами возле экспериментальных точек обозначены соответствующие значения.)

Как видно, расположение испытуемых материалов по уровню накопленных повреждений в оценке коэффициентом гомогенности m подобно их расположению по вязкости разрушения в оценке показателем $K_{стр}$ и расчетным показателем k_2 .

Значение коэффициента гомогенности m материала разрушенного образца на 10...12% выше такового неразрушенного, что обусловлено техническими ограничениями проведения массовых измерений твердости – твердость определяется не в зоне разрушения, а в непосредственной близости к ней.

Ориентируясь на значения приведенных выше параметров, при изготовлении листовых элементов конструкций их эксплуатационную надежность можно прогнозировать по уровню накопленных повреждений в материалах. В нашем случае исследуемые стали располагаются в следующей последовательности: 0Н9, 45, 25. В

такой же последовательности располагаются материалы, если ориентироваться на значения вязкости разрушения, предопределяющие их сопротивление развитию трещины.

Можно также отметить подобие оценок материала по эксплуатационной надежности с помощью коэффициентов интенсивности напряжений и параметров рассеяния характеристик твердости m_1 и m_2 .

Адекватное совпадение параметров k_1 и k_2 с коэффициентом интенсивности $K_{стр}$ позволяет для оценки эксплуатационной надежности материала использовать один из них, предпочтительнее k_1 . Этот параметр более чувствительный к структурным несовершенствам материала, связанным с режимом деформирования, не вызывает трудностей в его определении по значениям твердости.

Выводы

1. Показано, что при упругопластическом деформировании состояние поврежденности материала в зоне предразрушения одноосно нагруженного образца, находящегося под действием напряжения, близкого к пределу прочности материала, адекватно поврежденности материала в зоне вершины трещины перед ее страгиванием.

2. На основании установленной корреляции состояний материала предложен новый метод оценки эксплуатационной надежности листовых материалов по параметрам твердости, полученным при индентировании рабочей части нагруженного образца, деформируемого в условиях одноосного растяжения до напряжения, близкого к пределу прочности материала. При этом в качестве показателей трещиностойкости приняты коэффициенты гомогенности m_1 , m_2 и показатели надежности k_1 и k_2 .

3. С помощью параметров m_1 и m_2 можно провести качественный сравнительный анализ преимуществ различных листовых материалов по их способности к накоплению рассеянных повреждений при статическом растяжении и спрогнозировать эксплуатационную надежность по характеристикам твердости, используя в качестве показателя надежности параметры k_1 и k_2 , характеризующие меру поврежденности материала. Ориентируясь на эти показатели и на абсолютные значения параметров m_1 и m_2 , можно правильно и обосновано выбрать лучший материал для создаваемых конструкций. Указанные характеристики в расчетах по критериям прочности и долговечности в прямом виде не используются, однако являются выжными показателями эксплуатационной надежности изделий из листовых пластичных материалов без учета особенностей протекания локальных (вблизи концентратора) процессов.

4. Для оценки эксплуатационной надежности листовых материалов по разработанному методу не требуется нанесения предварительной усталостной трещины и проведения испытаний на вязкость разрушения.

Резюме

Запропоновано новий метод оцінки експлуатаційної надійності листових металевих матеріалів із трщиною за параметрами твердості. Показано, що стан матеріалу в зоні передруйнування одновісно навантаженого зразка, що знаходиться під дією напруження, близького до границі міцності матеріалу, відповідає стану пошкодженого матеріалу в зоні вершини трещини перед її стартом.

1. Сосновский Л. А., Махутов Н. А., Бордовский А. М., Воробьев В. В. Статистическая оценка деградации свойств материала нефтепровода // Завод. лаб. Диагностика материалов. – 2003. – № 11. – С. 40–49.

2. *ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.* – Введ. 27.03.85.
3. *Красовский А. Я., Вайниток В. А.* Критерий разрушения материалов, учитывающий вид напряженного состояния у вершины трещины // Пробл. прочности. – 1978. – № 5. – С. 64–69.
4. *Олейник Н. В., Куэт Нго Ван.* Определение вязкости разрушения материалов по их механическим свойствам // Там же. – 1976. – № 1. – С. 72–77.
5. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е.* Определение вязкости разрушения конструкционных материалов через их механические характеристики и параметр структуры // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – № 2. – С. 120–137.
6. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Швец В. П.* Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2007. – № 6. – С. 5–12.
7. *Романив О. Н., Ткач А. Н.* Микромеханическое моделирование вязкости разрушения металлов и сплавов // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – № 5. – С. 5–22.
8. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р.* Методы испытаний и механика разрушения листовых материалов при двухосном растяжении. – Луцк: Надстырь, 2004. – 214 с.
9. *Музыка Н. Р.* Развитие сквозной трещины в листовом материале при двухосном растяжении // Пробл. прочности. – 1998. – № 4. – С. 52–59.
10. *Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехтин В. И.* Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
11. *Александров А. Я., Ахметзянов М. Х., Албаут Г. Н. и др.* О поляризационно-оптических исследованиях при больших деформациях // Прикл. механика и техн. физика. – 1969. – № 5. – С. 89–99.
12. *Волков С. Д.* Проблема прочности и механика разрушения // Пробл. прочности. – 1978. – № 7. – С. 3–10.
13. *Барон А. А.* Исследование связи трещиностойкости и деформации перед вершиной трещины // Там же. – 1997. – № 2. – С. 33–40.
14. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р.* Несущая способность пластины с трещиной при двухосном растяжении // Там же. – 2001. – № 2. – С. 20–27.
15. *Курнышева Н. А.* Связанные (пластичность-поврежденность) задачи механики деформируемых сред: Автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук. – Чебоксары, 2007. – 20 с.
16. *Пат. 13952 Україна, МПК(2006) G01N3/00, G01N3/20.* Спосіб визначення в'язкості руйнування матеріалів / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, В. П. Швець. – Чинний від 17.04.2006.
17. *Трефилов В. И., Григорьев О. Н., Шатохин А. М.* О влиянии структурного состояния хрупких материалов на зависимость твердости от нагрузки // Докл. АН СССР. – 1981. – 259, № 4. – С. 836–839.
18. *Дуб С. Н., Новиков Н. В.* Испытание твердых тел на твердость // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 6. – С. 16–33.
19. *Кошкин В. И.* Оценка структуры и механических свойств материалов по статистическим характеристикам микротвердости. – М.: РИЦ МГИУ, 2001. – 62 с.

20. Гетманова М. Е., Ливанова О. В., Филиппов Г. А. и др. Структурная неоднородность и вязкость разрушения колесной стали // Деформация и разрушение металлов. – 2006. – № 12. – С. 32–37.
21. Викулин А. В., Солнцев Ю. П., Скобкин В. В. Влияние скорости приложения нагрузки и температуры на трещиностойкость конструкционных сталей // Пробл. прочности. – 1992. – № 7. – С. 30–33.
22. А.с. 796706 СССР, G 01 N 3/00. Способ определения вязкости разрушения материалов / В. М. Аваев, С. В. Журавлев. – Опубл. 15.01.1981, Бюл. № 2.
23. Корнев В. М., Кургузов В. Д. Многопараметрический достаточный критерий квазихрупкой прочности для сложного напряженного состояния // Физическая мезомеханика. – 2006. – 9, № 5. – С. 43–52.
24. Kass J. N., Begley J. A., and Andrejasik H. Crack initiation and growth in plane strain // J. Test. Eval. – 1974. – 2, No. 4. – P. 304–316.
25. Панасюк В. В., Бережницький Л. Г., Гром'як Р. С. Про вплив структури матеріалу на поширення тріщин у процесі розтягу тіла // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1976. – № 9. – С. 811–816.
26. Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В., Подколызин В. Ю. О природе разброса вязкости разрушения при статическом нагружении // Пробл. прочности. – 1990. – № 2. – С. 10–16.
27. Новожилов В. В. О пластическом разрыхлении // Прикл. механика и математика. – 1965. – 29, вып.4. – С. 681–689.
28. Долгоруков А. А., Махутов Н. А., Шлянников В. Н. Особенности решения задач нелинейной механики трещин при двухосном нагружении произвольного направления // Докл. АН СССР. – 1990. – 315. – С. 1073–1076.
29. Mokka R., Kotilainen H., and Forstan J. Hardness variations of the plastic zone area in bent COD specimens // Scand. J. Metall. – 1974. – 3, No. 1. – P. 38–40.
30. ДСТУ 7793. Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом LM-твердості. – Чинний від 01.04.2017.
31. Музыка Н. Р., Маковецкий И. В., Швец В. П. Оценка влияния напряженности материала на его повреждаемость при наработке // Пробл. прочности. – 2008. – № 4. – С. 102–107.
32. ДСТУ ЕН 10002-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури. – Чинний від 01.04.2007.

Поступила 04. 04. 2016