

Новый подход к оценке опасности коротких усталостных трещин

С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, Г. С. Меттус, Д. И. Никоненко

Институт металлофизики НАН Украины, Киев, Украина

Показана возможность использования предложенных ранее авторами новых физически обоснованных характеристик вязкости металла и охрупчивающего действия концентратора напряжений для анализа хрупкого разрушения, инициированного короткими трещинами. Приведена методика экспериментального определения величины параметра, который характеризует охрупчивающее действие этих дефектов и получено приближенное выражение для расчета его значения в случае короткой трещины. Для типичных конструкционных сталей построена зависимость коэффициента запаса вязкости стали с короткой трещиной от уровня прочности данного материала. Сформулированы требования к уровню вязкости сталей, при котором дефекты этого типа не представляют опасности.

Введение. Короткие усталостные трещины представляют интерес для исследования, поскольку методы классической механики разрушения не позволяют адекватно оценить их опасность. Обычно выделяют две основные причины, обуславливающие отличие в закономерностях разрушения образцов с короткими и длинными (классическими) трещинами [1]. Это – иной закон распределения напряжений в окрестности вершины короткой трещины и соизмеримость размеров области локальной текучести с характерным размером структурного элемента металла. В настоящее время является принципиальной проблемой расчет в *континуальном* приближении распределения напряжений и пластических деформаций в вершине короткой трещины [2]. Сложность заключается в том, что континуальный подход не применим для описания пластической деформации в области, характерный размер которой соизмерим с размером зерна.

В прикладном плане актуальность исследования разрушения, инициируемого короткими трещинами, обусловлена тем, что эти дефекты являются типичными представителями класса “мелких” дефектов [3]. К ним относятся: царапины, волосовины, мелкие трещины в сварных соединениях и зонах термического влияния, а также другие повреждения металлургического и технологического происхождения, практически всегда присутствующие в сварных соединениях и металле массового производства. Такие дефекты вследствие малости их размеров ($\approx 0,1...0,5$ мм) довольно сложно обнаружить применяемыми в технике стандартными методами дефектоскопического контроля. Кроме того, “мелкие” дефекты в виде коротких усталостных трещин могут возникать в процессе эксплуатации изделий. В силу указанных причин *радикальным* средством обеспечения надежности металлоконструкций является использование сталей, которые в интервале эксплуатационных температур имеют уровень вязкости, позволяющий противостоять охрупчивающему действию дефектов этого класса.

Цель настоящей работы – дать количественную оценку опасности коротких трещин и сформулировать требования к свойствам металла, при которых эти дефекты не могут инициировать хрупкое (квазихрупкое) разрушение.

Теоретические представления. В основу предлагаемого подхода положены представления, изложенные ранее [4]. В соответствии с ними выражение для обобщенного параметра E_m , описывающего охрупчивающее действие произвольного концентратора напряжений, имеет вид

$$E_m = \frac{j(e_i^p / e_T)^n}{K_{ss}}, \quad (1)$$

где j – создаваемая концентратором жесткость напряженного состояния, $j = \sigma_1 / \sigma_i$ (σ_1 – максимальное растягивающее напряжение в вершине концентратора, σ_i – интенсивность напряжений); e_i^p – интенсивность пластических деформаций в точке, в которой инициируется разрушение; e_T – величина остаточных деформаций на пределе текучести; n – показатель деформационного упрочнения металла; K_{ss} – коэффициент, показывающий, во сколько раз локальное напряжение разрушения σ_c металла в вершине концентратора больше минимального напряжения разрушения R_{mc} при одноосном растяжении.

В случае квазихрупкого разрушения выполняется условие

$$E_m = K_B, \quad (2)$$

где K_B – коэффициент вязкости металла,

$$K_B = R_{mc} / \sigma_T; \quad (3)$$

R_{mc} – минимальное напряжение хрупкого разрушения металла при одноосном растяжении (рис. 1); σ_T – предел текучести металла.

Согласно уравнениям (1) и (2), для описания квазихрупкого разрушения металла, содержащего произвольный концентратор напряжений, в том числе короткую трещину, необходимо знать свойства металла при одноосном растяжении (σ_T , n , R_{mc}), а также располагать параметрами напряженно-деформированного состояния (НДС) в вершине трещины (j , e_i^p). Как отмечено выше, рассчитать параметры НДС в вершине короткой трещины достаточно сложно, однако экспериментальное определение величины E_m не представляет методических трудностей. Для этого необходимо по результатам испытаний образцов с короткими усталостными трещинами установить температуры, при которых имеет место квазихрупкое разрушение, и для этих температур, используя данные испытаний образцов на одноосное растяжение, найти значения коэффициента вязкости K_B .

Особенность квазихрупкого разрушения, инициируемого короткими трещинами и другими “мелкими” дефектами в условиях квазистатического нагружения, заключается в том, что температура хладноломкости T_x образцов с этими дефектами лежит в области достаточно низких температур, т.е. они не могут быть причиной потери несущей способности образца ($\sigma_N < \sigma_T$), однако способны вызвать потерю пластичности металла (рис. 1).

Вследствие этого представляет практический интерес значение E_m для коротких трещин при температуре нулевой пластичности $T_{н.п.}$.

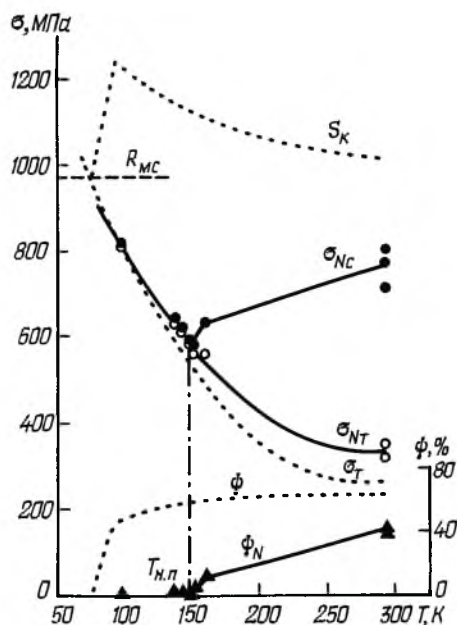


Рис. 1. Влияние “мелкого” дефекта (кольцевой надрез глубиной 0,2 мм и радиусом в вершине 0,05 мм) на характеристики разрушения стали Ст.3сп. (Сплошные линии – образцы с концентратором, пунктирные – гладкие образцы; σ_T – предел текучести, S_k – истинное напряжение разрушения, R_{mc} – минимальное напряжение хрупкого разрушения, ψ – относительное сужение гладких образцов, σ_{NT} – напряжение общей текучести, σ_{Nc} – номинальное напряжение в момент разрушения, ψ_N – относительное напряжение в надрезанном сечении образцов с концентраторами напряжений.)

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение.

Экспериментальные значения E_m при $T_{н.п.}$ определяли по методике, аналогичной описанной для конструктивных концентраторов [4]. С этой целью проводили низкотемпературные испытания гладких (без концентраторов) цилиндрических образцов на одноосное растяжение. По результатам этих испытаний кроме стандартных механических характеристик ($\sigma_T(\sigma_{0,2})$, σ_B , S_k , ψ , n) находили значения R_{mc} (рис. 1) и строили температурную зависимость коэффициента вязкости металла K_B (3). Для определения температуры нулевой пластичности $T_{н.п.}$ проводили испытания на растяжение образцов с кольцевыми усталостными трещинами. В соответствии с условием (2), значение K_B при этой температуре численно равно $E_m(T_{н.п.})$.

Кольцевые усталостные трещины глубиной 1 мм наносили по известной методике, [5], после чего надрез, из которого выращивалась трещина, и часть самой трещины шлифовались. В итоге максимальный диаметр образца составлял 8 мм, а глубина трещины – 0,25 мм. Для того чтобы проверить сделанный в работе [3] вывод о том, что для мелких надрезов предельно острым является радиус надреза 0,05...0,07 мм, дополнительно проводились испытания образцов с мелким кольцевым надрезом радиусом 0,05 мм.

Экспериментальные значения $E_m(T_{н.п.})$ приведены в таблице. Как видно, несмотря на достаточно широкий интервал значений прочности исследуемых материалов, величина $E_m^3(T_{н.п.})$ изменяется в узком диапазоне – от 1,62 до 1,88. Изменение этого параметра обусловлено разной склонностью сталей 60 и 12ХНЗМА к деформационному упрочнению. Согласно (1), это является отражением общей закономерности разрушения металла в условиях концентрации напряжений, которая была экспериментально подтверждена при испытании образцов с конструктивными концентраторами и длинными трещинами [4].

Характеристики разрушения сталей, содержащих короткие усталостные трещины

Сталь и термообработка	$\sigma_{0,2}$, МПа ($T = 293$ К)	$n(T_{н.п.})$	$E_m^3(T_{н.п.})$	j/K_{ss}	
60, отжиг	400	0,11	1,88	1,46	
12ХНЗМА*	ТО1	710	0,04	1,68	1,53
	ТО2	850	0,06	1,66	1,45
	ТО3	960	0,05	1,62	1,45
	ТО4	980	0,05	1,66	1,48
				Среднее значение $1,47 \pm 0,03$	
Ст.3сп**	300	0,06	1,63	1,42	

* Режимы термической обработки (ТО) стали 12ХНЗМА отличаются значением температуры отпуска.

** Кольцевой надрез глубиной 0,20 мм и радиусом в вершине 0,05мм.

Чтобы получить в явном виде зависимость E_m от показателя деформационного упрочнения n , необходимо знать величину локальной деформации в области разрушения e_i^p и значение отношения j/K_{ss} . В качестве эффективного значения локальной деформации разрушения при $T_{н.п.}$ можно использовать критическую деформацию e_c [6, 7]. Для сталей $e_c \approx 0,02$. Подставив эту величину в зависимость (1) и приняв $e_T \approx 0,002$, получим

$$E_m(T_{н.п.}) = \frac{j}{K_{ss}} \cdot 10^n. \quad (4)$$

В таблице также приведены значения j/K_{ss} , рассчитанные с учетом зависимости (4) на основании экспериментальных значений $E_m(T_{н.п.})$ и $n(T_{н.п.})$. Как видно, j/K_{ss} является практически постоянной величиной, равной 1,47. Это позволяет получить приближенную зависимость для оценки охрупчивающего действия коротких усталостных трещин при температуре нулевой пластичности:

$$E_m(T_{н.п.}) \approx 1,47 \cdot 10^n. \quad (5)$$

Анализ зависимостей (4), (5) показывает, что охрупчивающее действие указанного дефекта в значительной степени зависит от склонности металла

к деформационному упрочнению. На рис. 2 представлены зависимости значений E_m от показателя деформационного упрочнения n для коротких усталостных трещин и конструктивных концентраторов с $\alpha_\sigma = 1,5$ и $\alpha_\sigma = 3^*$ (α_σ – нейберевский коэффициент концентрации напряжений). Там же приведены значения коэффициентов вязкости K_B для наиболее распространенных конструкционных сталей в интервале климатических температур (213...293 К). Из рисунка следует, что увеличение склонности стали к деформационному упрочнению отрицательно влияет на ее способность противостоять охрупчивающему действию концентраторов напряжений. Проведенные расчеты показывают, что для типичных низкопрочных сталей ($K_B \geq 1,75...2,05$) короткие трещины не представляют опасности в интервале климатических температур. В то же время они могут инициировать хрупкое разрушение высокопрочных сталей ($K_B = 1,2...1,6$).

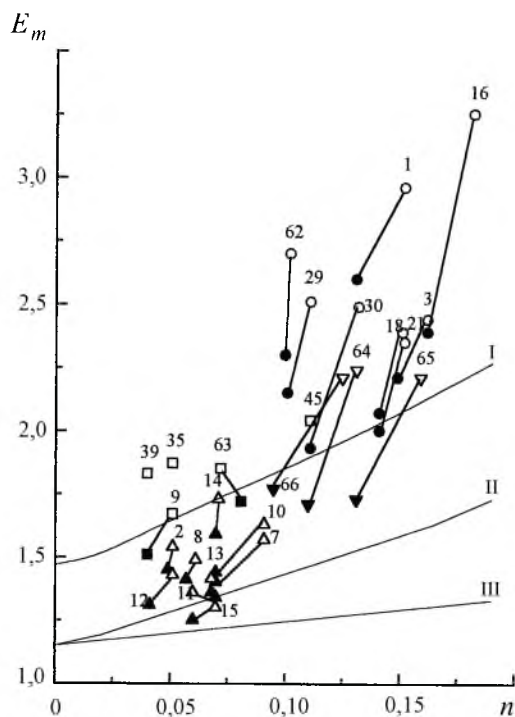


Рис. 2. Влияние показателя деформационного упрочнения n на величину параметра $E_m(T_{и,п})$ для короткой усталостной трещины (I) и параметра $E_m(T_x)$ для концентраторов напряжений с величиной коэффициента концентрации $\alpha_\sigma = 3$ (II) и $1,5$ (III). Точки – значения коэффициентов вязкости K_B при $T = 293$ и 213 К для сталей следующих марок: 1 – 30; 2 – У8; 3 – 15ГС; 7 – 30ХГСА ($\sigma_{0,2} = 1360$ МПа); 8 – 30ХГСА ($\sigma_{0,2} = 1440$ МПа); 9 – 35ХГСЛ; 10 – 30ХГСНА ($\sigma_{0,2} = 1200$ МПа); 11 – 30ХГСНА ($\sigma_{0,2} = 1210$ МПа); 12 – 50ХФА; 13 – 40Х2СВА; 14 – 18Х2Н4ВА; 15 – 42Х2ГСНМ; 16 – 1Х13; 18 – 3Х13; 21 – 2Х13; 29 – 20; 30 – 40; 35 – ЭП410; 39 – ЭП434; 45 – 38Х; 62 – 10ХСНД (из [3]); 64, 65 и 66 – азотистые стали, ГЦК-решетка при содержании азота 0,78; 0,77 и 1,12% соответственно [8].

* При сопоставлении значений параметра E_m для коротких усталостных трещин и конструктивных концентраторов необходимо учитывать, что в первом случае он характеризует охрупчивающее действие трещины при температуре нулевой пластичности, а во втором – при температуре хладноломкости.

Для количественной оценки опасности коротких трещин удобно воспользоваться коэффициентом запаса вязкости металла $K_{3,в}$ [4]. Величина последнего определяется как отношение вязкости металла при одноосном растяжении $K_{в}$ к значению параметра E_m , характеризующего охрупчивающее действие концентратора напряжений:

$$K_{3,в} = \frac{K_{в}}{E_m}. \quad (6)$$

Если $K_{3,в} \leq 1$, то это значит, что вязкость металла недостаточна для противодействия охрупчивающему влиянию концентратора напряжений. В противном случае металл имеет запас вязкости, который характеризуется абсолютной величиной $K_{3,в}$.

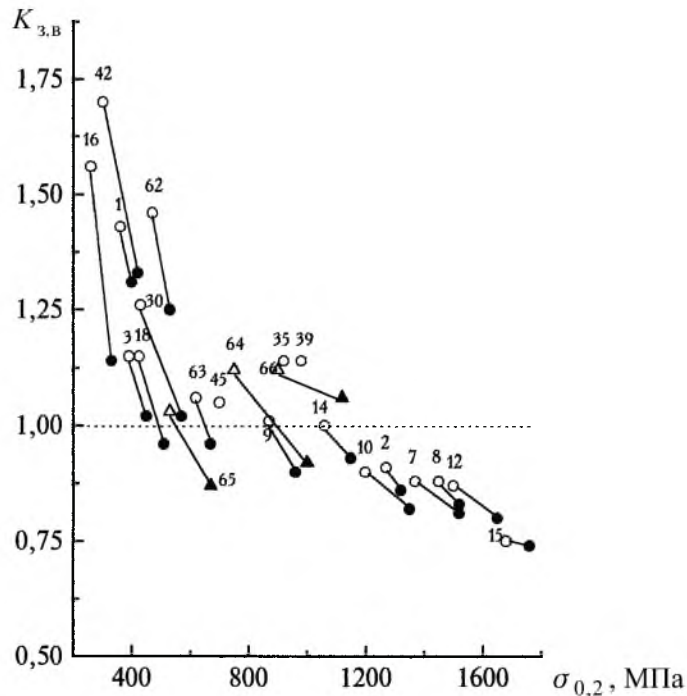


Рис. 3. Влияние прочности типичных конструкционных сталей на величину коэффициента запаса вязкости по отношению к охрупчивающему действию при температуре нулевой пластичности коротких усталостных трещин длиной 0,25 мм. (Обозначения те же, что и на рис. 2.)

Подставив в выражение (6) значение E_m (5), можно получить зависимость для определения запаса вязкости металла в изделии, содержащем короткую трещину, применительно к ситуации, когда уровень номинальных напряжений достигнет величины предела текучести металла:

$$K_{3,в} \approx \frac{K_{в}}{1,47 \cdot 10^n}. \quad (7)$$

Зависимости $K_{3,В}$ от уровня прочности стали при температурах 297 и 213 К, приведенные на рис. 3, свидетельствуют, что для типичных конструкционных сталей, имеющих прочность 700...900 МПа и выше, рассматриваемые дефекты представляют опасность в интервале климатических температур при $\sigma_N = \sigma_{0,2}$. В этих условиях особенно опасны короткие трещины для сталей с $\sigma_T \geq 1200$ МПа.

Необходимо отметить, что изделия из высокопрочных сталей – это, как правило, тонкостенные конструкции, поэтому здесь конструктивные концентраторы и мелкие поверхностные дефекты технологического происхождения являются типичными источниками опасных локальных перенапряжений. Для того чтобы не допустить хрупкого разрушения таких изделий в случае перегрузок, когда во всем сечении силового элемента или на отдельных его участках растягивающие напряжения могут достичь значения $\sigma_{0,2}$, необходимо, чтобы уровень вязкости этих сталей был не ниже $K_B \approx 1,65$. Примером таких высокопрочных материалов могут служить легированные стали типа 12ХНЗМА, у которых при $\sigma_{0,2} \approx 800...1000$ МПа $K_B \approx 1,9...2,2$.

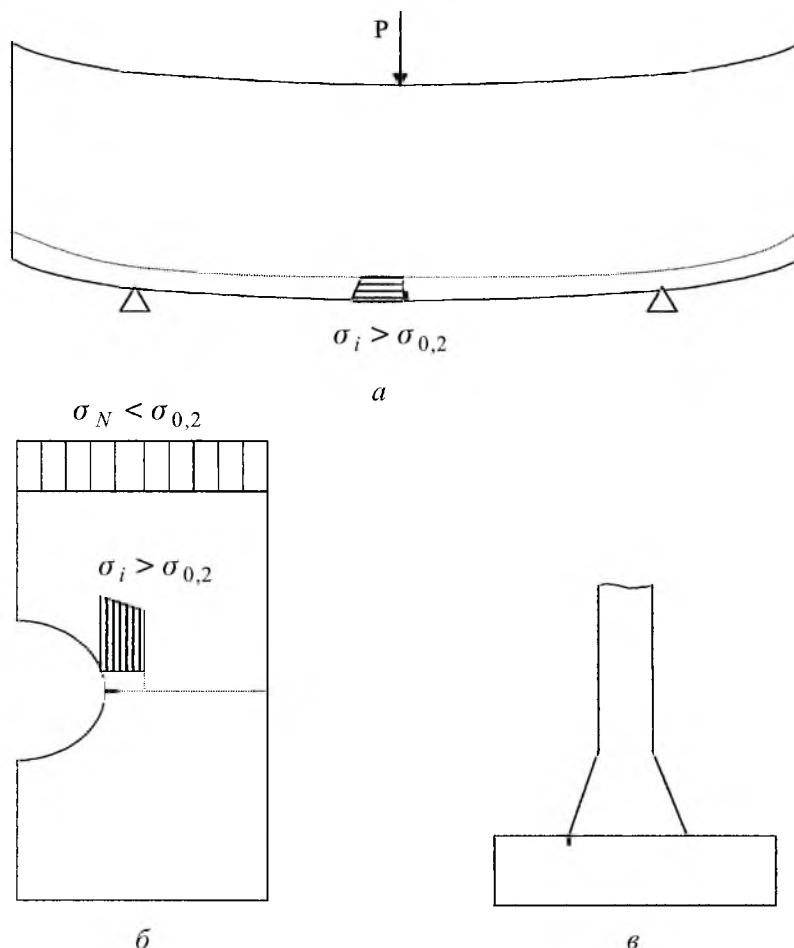


Рис. 4. Опасное расположение коротких трещин: а – на растянутой стороне балки; б – в вершине концентратора напряжений; в – в сварном шве.

Следует также подчеркнуть, что в проведенных экспериментах значения E_m определялись при разрушении образцов в условиях общей текучести, когда номинальное напряжение равно пределу текучести материала. На практике такая ситуация может реализоваться на *локальных* участках нагруженных элементов. Примером таких локальных участков могут быть крайние “волокна” работающих на изгиб балок, локальные области металла в окрестности конструктивных концентраторов и т.п. (рис. 4). В соответствии с подходами, которые используются при инженерных расчетах на прочность, выполнение условия $\sigma_i = \sigma_T$ в области глубиной до 1 мм для балки высотой 100 мм и более вполне допустимо. Аналогичная ситуация может иметь место и в окрестности концентраторов напряжений. Однако если в этой области окажется мелкий дефект, то при уровне вязкости $K_v < E_m(T_{н.п.})$ может произойти хрупкое разрушение изделия при номинальных напряжениях, намного меньших величины предела текучести. Наиболее уязвимы в этом отношении – сварные соединения, что обусловлено рядом причин:

в большинстве случаев геометрия сварных соединений такова, что они представляют собой концентраторы напряжений (рис. 4,в) [9];

в местах сварки велика вероятность существования дефектов в виде волосовин, непроваров, мелких шлаковых включений и т.п.;

уровень вязкости сварного шва или металла в зоне термического влияния значительно ниже вязкости основного металла;

в ряде случаев имеют место остаточные растягивающие напряжения.

В настоящей работе оценена опасность коротких трещин длиной 0,25 мм. Аналогичные исследования позволяют установить зависимость E_m от длины трещины и величины σ_N / σ_T . На наш взгляд, ценность полученных при этом результатов заключается в первую очередь в том, что они показывают *принципиальную* возможность описать *с единых позиций и в единых параметрах* охрупчивающее действие разных типов концентраторов напряжений – конструктивных концентраторов, классических (длинных) [4] и коротких трещин. Кроме того, появляется возможность сформулировать требования к уровню вязкости сталей и осуществить их ранжировку по величине этого параметра. При этом речь идет об оценке вязкости стали по отношению к конкретной ситуации ее разрушения в конструкции, чего нельзя сделать на основе данных об ударной вязкости, которая используется в настоящее время для оценки качества конструкционных сплавов. Преимущество предлагаемой характеристики вязкости заключается в том, что ее можно выразить через механические характеристики (R_{mC}, σ_T), которые имеют ясный физический смысл и однозначную связь с параметрами микроструктуры. Последнее создает определенные удобства для материаловедов, поскольку показывает, как можно достичь требуемых свойств металла.

Выводы

1. Охрупчивающее действие коротких трещин в значительной степени зависит от склонности металла к деформационному упрочнению, оно возрастает с увеличением показателя деформационного упрочнения.

2. Короткие усталостные трещины могут инициировать хрупкое разрушение в интервале климатических температур (293...213 К) *типичных* конструкционных сталей с уровнями прочности 700...900 МПа и выше.

3. Для безопасного нагружения силовых элементов конструкций из высокопрочных сталей ($\sigma_{0,2} \geq 1000$ МПа) уровень их вязкости должен быть не ниже $K_v = 1,65$.

Резюме

Показана можливість використання запропонованих раніше авторами нових фізично обґрунтованих характеристик в'язкості металу та окрихчуючої дії концентратора напружень з метою аналізу квазікрихкого руйнування, ініційованого короткими тріщинами. Запропоновано методику експериментального визначення величини параметра, який характеризує окрихчуючу дію цих дефектів, та отримана наближена залежність для розрахунку його значення для короткої тріщини. Для типових конструкційних сталей встановлена залежність коефіцієнта запасу в'язкості сталі з короткою тріщиною від рівня її міцності. Сформульовано вимоги до рівня вязкості, за якого дефекти цього типу не є небезпечними.

1. Miller A. K. Towards unified computer models for predicting fracture of solids // Annu. Rew. Mater. Sci. – 1989. – N 19. – P. 439 – 469.
2. Holzmann M., Dlouhy I., Kozak V. Current and perspective problems in fracture mechanics // Proc. of Int. Conf. FRACTOGRAPHY'97, Oct. 26–29, 1997, IMR SAS Kosice, Slovakia. – P. 189 – 199.
3. Мешков Ю. Я., Сердитова Т. Н. Разрушение деформированной стали. – Киев: Наук. думка, 1989. – 160 с.
4. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С., Никоненко Д. И. Механика и физика квазихрупкого разрушения поликристаллических металлов в условиях концентрации напряжений. Сообщ. 3. Вязкость металлов и сплавов // Пробл. прочности. – 2000. – № 1. – С. 72 – 92.
5. Козут Н. С. Трещиностойкость конструкционных материалов. – Львов: Вища шк., 1986. – 215 с.
6. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С. О физической природе прочности поликристаллических металлов в области температур вязкохрупкого перехода // Металлофизика и новейшие технологии. – 1994. **16**, № 1. – С. 31 – 34.
7. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С. Механика и физика квазихрупкого разрушения поликристаллических металлов в условиях концентрации напряжений. Сообщ. 1. Экспериментальные закономерности // Пробл. прочности. – 1997. – № 4. – С. 5 – 16.
8. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Никоненко Д. И. Структура и свойства высокоазотистых хромомарганцевых сталей // Металлофизика и новейшие технологии. – 1994. – **16**, № 4. – С. 61 – 65.
9. Копельман Л. А. Сопrotивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.

Поступила 18. 02. 99