

Еремин Константин Иванович

д-р техн. наук, директор
ООО «НИИ региональной безопасности»
г. Магнитогорск, Челябинская область

Еремин Георгий Константинович

аспирант, заместитель директора
ООО «НИИ региональной безопасности»
г. Магнитогорск, Челябинская область

Нащёкин Максим Валерьевич

канд. техн. наук, руководитель проектного офиса
ООО «МСБ-Инжиниринг»
г. Магнитогорск, Челябинская область

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРОКАТА НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация: в статье рассматривается актуальная проблема эксплуатации стальных резервуаров для хранения жидкостей и газов – образование и развитие усталостных трещин. Анализируются основные причины их возникновения, связанные с циклическими нагрузками, концентраторами напряжений и коррозионной средой. Описаны характерные места локализации дефектов. Отмечена необходимость изучения влияния анизотропии проката на безопасность листовых металлоконструкций. Изучены параметры статической и циклической трещиностойкости строительных сталей в климатическом диапазоне температур. Сделаны выводы о влиянии плоскостной анизотропии проката на статическую и циклическую трещиностойкость сталей. Указаны возможные направления дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: стальной резервуар, листовые металлические конструкции, циклические нагрузки, усталостные трещины, остаточный ресурс, параметры трещиностойкости, анизотропия проката.

Листовые металлические конструкции (ЛМК): стальные резервуары (РВС – вертикальные, РГС – горизонтальные, изотермические и др.), газопроводы являются критически важными объектами инфраструктуры в нефтегазовой, химической, энергетической и других отраслях промышленности. Их безопасная эксплуатация в течение проектного срока службы (25–30 лет и более) – приоритетная задача. Одним из наиболее опасных видов повреждений являются усталостные трещины – постепенное зарождение и развитие трещин под действием переменных (циклических) нагрузок, величина которых существенно ниже предела прочности материала. Их опасность заключается в не явном характере развития вплоть до внезапного хрупкого разрушения, которое может привести к катастрофическим последствиям. Согласно [1, с. 48–52] в период с 1950 по 2006 гг. в СССР, а после его распада, в России и странах СНГ зарегистрировано более 140 случаев квазимгновенного разрушения РВС. Причем данная статистика не отражает всей полноты проблемы. По данным ЦНИИПСК [2, с. 24–26] фактическое количество аварий в 3–5 раз больше регистрируемых. При этом количество аварий, причинами которых является хрупкое разрушение, достигает 63,1% от их общего числа [1, с. 19].

Усталостное разрушение – процесс, состоящий из нескольких стадий:

– накопление повреждений: под действием циклических нагрузок в материале происходят необратимые микроскопические изменения структуры;

– зарождение трещины: на участках с максимальными местными напряжениями (у концентраторов) образуются микротрещины. Часто они зарождаются на поверхности, где действуют наибольшие напряжения и возможно влияние коррозии;

– стабильный рост трещины (развитие): трещина постепенно распространяется с каждым циклом нагружения. Скорость роста зависит от размаха напряжений, геометрии трещины и свойств материала;

– мгновенное разрушение: когда длина трещины достигает критического значения (определяемого вязкостью разрушения материала), происходит быстрое хрупкое или вязкое разрушение оставшегося сечения.

Основными причинами возникновения и местами локализации усталостных трещин в резервуарах являются циклические нагрузки и зоны концентрации напряжений.

К источникам циклических нагрузок можно отнести:

- переменное гидростатическое давление: циклы «наполнение-опорожнение» резервуара, что является основным видом нагружения, оказывающим наиболее опасное воздействие на зоны изменения толщин стенок и днища;
- температурные деформации: суточные и сезонные колебания температуры, вызывающие циклические термические напряжения;
- ветровые и сейсмические воздействия, вызывающие знакопеременные изгибаемые напряжения в стенках;
- вибрации от работающего оборудования (насосы, компрессоры) или гидродинамических процессов.

Основными зонами возникновения трещин являются:

- зона сопряжения стенки с днищем: наиболее нагруженная зона из-за изгибающих моментов, высокой концентрации сварных швов и воздействия агрессивного продукта с внутренней стороны. Коррозионная среда многократно ускоряет процесс (коррозионная усталость);
- сварные швы, для которых характерны непровары, подрезы, поры, смещения кромок служат естественными концентраторами. Трещины часто идут вдоль границы сплавления или по зоне термического влияния;
- отверстия и патрубки: зоны вокруг люков-лазов, штуцеров, сифонных труб испытывают значительные местные напряжения;
- зоны установки оборудования (лестницы, подмости): точечные крепления создают локальные пики напряжений;
- дефекты монтажа и эксплуатации: вмятины, следы ударов и пр.

Но в общей проблематике изучения механизма развития трещин и как следствие, оценки ресурса резервуаров и газопроводов не учитывается, что трещины растут как вдоль, так и поперек направления прокатки исходных листов, из которых изготовлены ЛМК. Для оценки остаточного ресурса указанных конструкций

с исходными трещиноподобными дефектами сварки и/или трещинами, необходимо располагать данными о характеристиках стали, в том числе о параметрах статистической и циклической трещиностойкости как вдоль, так и поперек направления прокатки листов.

Исследования проведены на сталях ВСтЗсп5 и 09Г2С толщиной 25мм. Механические характеристики приведены в таблице 1, химический состав исследуемых сталей приведен в таблице 2. Исследуемый диапазон температуры +20°С: -60°С соответствует климатическому, в котором эксплуатируются ЛМК.

Таблица 1

Механическая характеристика исследуемых сталей при $T = +20^{\circ}\text{C}$

Сталь	Направление прокатки	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	Ψ %	δ , %	Размер зерна феррита, мм
09Г2С	вдоль	345	516	73,6	30,2	0,0367
09Г2С	поперек	348	510	74,0	31,5	0,0348
ВСтЗсп	вдоль	298	448	60,6	28,0	0,0492
ВСтЗсп	поперек	276	442	55,6	26,8	0,0485

Таблица 2

Химический состав исследуемых сталей, %

С	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
0,09	0,59	1,62	0,022	0,031	0,04	0,08	0,10	<0,005	0,01
0,18	0,23	0,52	0,026	0,014	0,02	0,06	0,09	<0,005	<0,005

Образцы для определения статической трещиностойкости соответствовали четвертому типу – плоский прямоугольный образец с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб. Исходная усталостная трещина подрацивалась при циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии $R=0,1$ и уровне номинальных напряжений $\sigma_H=0,46\sigma_T$. Чистота нагружения – 7 Гц. Изменения параметров статической трещиностойкости для исследуемых сталей диапазоне температуры +20°С ÷ -60°С изучали с помощью метода J-интеграла. Возможность использования J-интеграла как критерия разрушения доказана в работах. Методика экспериментального определения J-интеграла обоснована и детально изложена в работах [4–14].

В результате испытания указанных образцов получены значения K_{IC} в зависимости от температуры испытания и направления прокатки для исследуемых сталей (таблица 3).

Таблица 3

Значение параметров статистической трещиностойкости K_{IC} для сталей 09Г2С и ВСт3сп

Т°С	K_{IC} Мпа $\sqrt{м}$, развитие трещин поперек прокатки развитие трещин поперек прокатки	
	Сталь ВСт3сп	Сталь 09Г2С
+20	148,0/125,3	169,7/150,3
0	140,4/130,4	169,3/148,6
-10	142,8/111,8	164,2/135,7
-20	147,3/107,9	156,8/128,4
-30	138,5/96,4	158,9/120,6
-40	130,1/87,2	152,4/110,2
-50	124,9/83,7	149,4/103,4
-60	125,6/80,1	142,1/94,1

Как видно на графиках, направление прокатки листа существенно влияет на статистическую трещиностойкость исследуемых сталей во всем диапазоне температур испытаний от +20°С до -60°С. При этом значение K_{IC} выше в случае, когда трещина развивается поперек направления прокатки листа, как для стали ВСт3сп, так и для стали 09Г2С. Графики представлены на рисунках 1, 2.

Параметры циклической трещиностойкости «С» и «n» для исследуемой стали определяли при испытании плоских комплектных образцов на внецентренное растяжение третий тип образцов по стандартной методике [5; 6; 13].

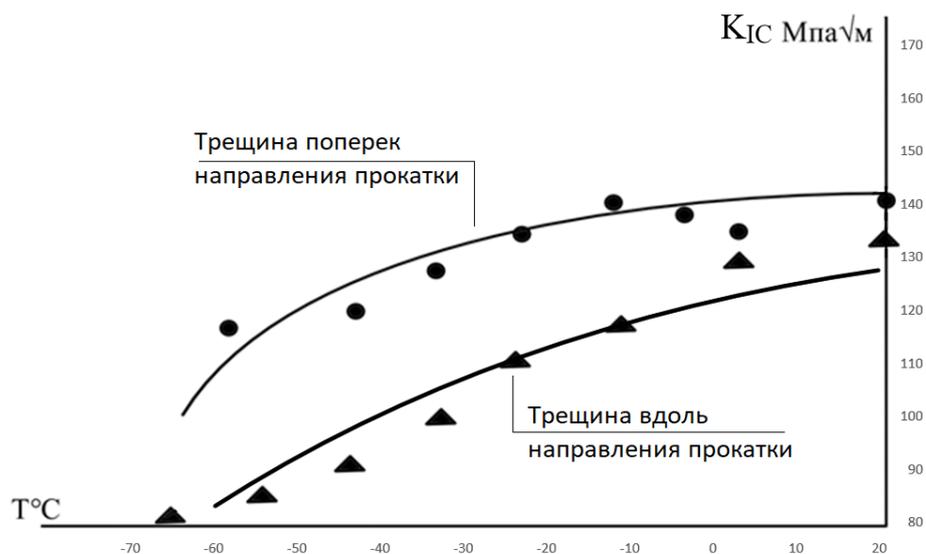


Рис. 1. Температура зависимости K_{IC} для стали ВСт3сп

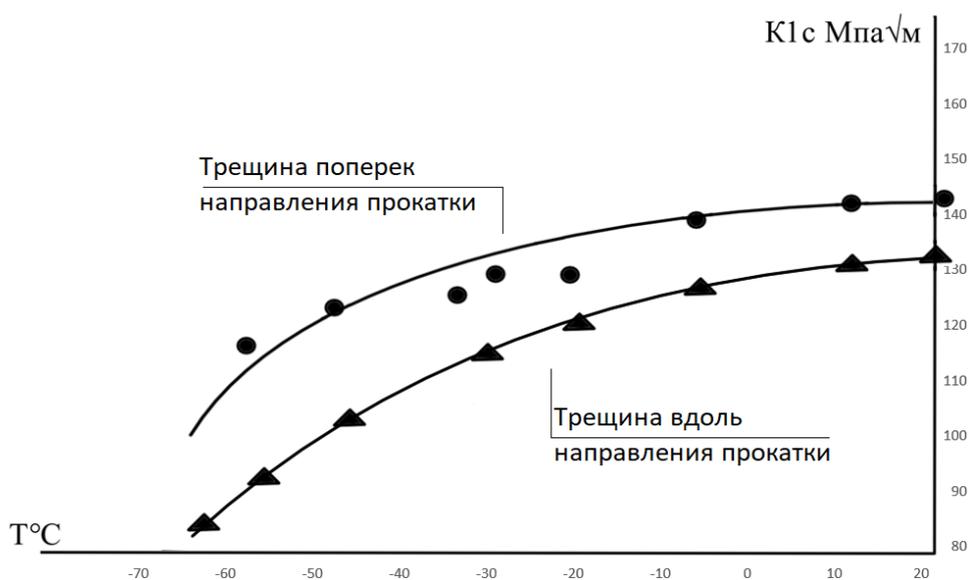


Рис. 2. Температура зависимости K_{IC} для стали 09Г2С

В результате испытаний получены зависимости приращения длины трещины от числа циклов нагружения для сталей 09Г2С и ВСт3сп в зависимости от направления прокатки.

Результаты представлены в виде графиков аппроксимированных зависимостей (в двойных логарифмических координатах) скорости роста трещины от

размаха коэффициента интенсивности напряжения $-\log dl/dN - \log \Delta K$. Значение параметров «С» и «n» приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры циклической трещиностойкости при $T = 20^\circ\text{C}$

Сталь	Вдоль прокатки		Поперек прокатки	
	$C, \frac{\text{мм/цикл}}{\text{МПа}\sqrt{\text{м}}}$	n	$C, \frac{\text{мм/цикл}}{\text{МПа}\sqrt{\text{м}}}$	n
09Г2С	$4,82 \cdot 10^{-11}$	$2,89 \cdot 10^{-11}$	$8,03 \cdot 10^{-11}$	2,36
ВСтЗсп	$5,52 \cdot 10^{-11}$	$2,61 \cdot 10^{-11}$	$8,42 \cdot 10^{-11}$	2,42

Анализ полученных данных показывает, что скорость роста трещины в стали ВСтЗсп при размахе коэффициента интенсивного напряжения $\Delta K=20-60$ Мпа $\sqrt{\text{м}}$ вдоль направления прокатки в 1,1–1,5 раза превышает скорость развития трещины поперек направления прокатки. В тоже время в стали 09Г2С трещина растет быстрее вдоль направления прокатки листа в 2,9–5,1 раза, чем поперек при тех же размахах коэффициента интенсивных напряжений $\Delta K=20-60$ Мпа $\sqrt{\text{м}}$. Это свидетельствует о большой чувствительности стали 09Г2С к анизотропии проката по сравнению со сталью ВСтЗсп.

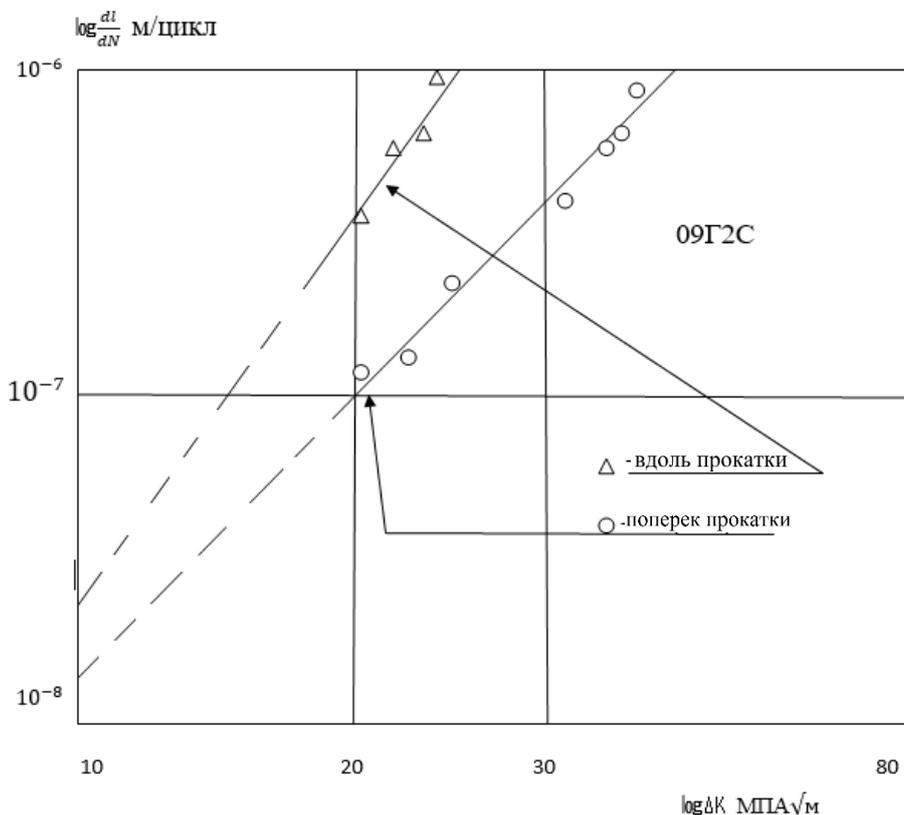


Рис. 3. Диаграммы циклической трещиностойкости для стали 09Г2С
при $T = 20^{\circ}\text{C}$

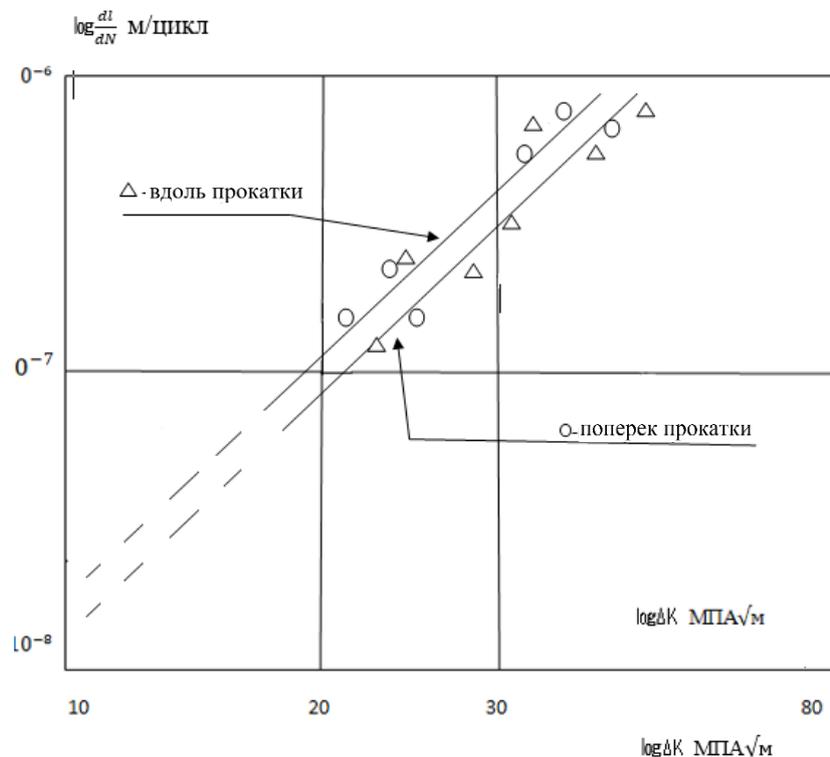


Рис. 4. Диаграммы циклической трещиностойкости для стали ВСтЗсп
при $T = 20^{\circ}\text{C}$

Выводы.

1. Плоскостная анизотропия проката существенно влияет на статическую трещиностойкость сталей 09Г2С и ВСтЗсп5 толщиной 25 мм во всем исследуемом диапазоне температур от $+20^{\circ}\text{C}$ до -60°C . Статическая трещиностойкость K_{IC} у исследованных сталей выше, когда трещина развивается поперек направления прокатки листа.

2. Анизотропия проката существенно влияет на циклическую трещиностойкость стали 09Г2С. В данной стали трещина растет вдоль направлении прокатки листов в 3–5 раз быстрее чем поперек.

2.1. Влияние анизотропии проката на циклическую трещиностойкость стали ВСтЗсп5 менее выражено по сравнению со сталью 09Г2С, но, тем не менее,

данное влияние экспериментально отмечено. В стали ВСтЗсп5 трещина растет вдоль направления прокатки листов в 1,5 раза быстрее, чем поперек.

3. Для современных сталей, применяемых в листовых металлических конструкциях, необходима постановка новых экспериментальных исследований по изучению влияния плоскостной анизотропии проката на статическую и циклическую трещиностойкость данных сталей. При этом выполнение исследований необходимо на реальных толщинах применяемых сталей в условиях воздействия реальных температур эксплуатации ЛМК, изготовленных из данных сталей.

4. Необходимо дальнейшее совершенствование методики длительных низкотемпературных испытаний в привязке к лабораторному охлаждению не только стандартных испытуемых образцов, но и применительно к низкотемпературным испытаниям фрагментов, а также крупномасштабных и даже полномасштабных узлов реальных конструкций.

5. Помимо указанных в пунктах 1, 2 выводов кроме исследований влияния плоскостной анизотропии проката необходимы исследования параметров статической и циклической сталей Z-направлении для сталей, применяемых в ЛМК (особенно для толстолистового проката), включая изучения параметров статической и циклической трещиностойкости Z-направления для случаев слоистого растрескивания.

6. Поскольку в настоящее время в большинстве случаев ЛМК являются сварными, исследование свойств необходимо вести не только для основного металла, но и для зон сварного соединения, а именно металла шва и металла околошовной зоны. Исследования необходимы для реально применяемой технологии сварки и для реальных температур эксплуатации.

7. С целью оценки остаточного ресурса эксплуатируемых ЛМК также необходима постановка полномасштабных экспериментально-теоретических исследований по изучению влияния остаточных сварочных и технологических напряжений на развитие усталостной трещины, а также влияние самой растущей трещины на перераспределение и релаксацию остаточных сварочных напряжений.

8. Необходимо создание методик оценки остаточного ресурса ЛМК, учитывающих одновременно как влияние анизотропного проката, так и остаточных сварочных и технологических напряжений, а также реальных температур эксплуатации. Это позволит корректнее оценить остаточный ресурс указанных конструкций и обоснованно запланировать периоды текущих и капитальных ремонтов, и в итоге повысить безопасность как отдельной ЛМК, так прилегающей инфраструктуры.

1. *Список литературы*

2. Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.П. Сорокоумов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. №6. – С. 48–52. EDN KNVKWX

3. Кандаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения / Г.П. Кандаков // Промышленное и гражданское строительство. – 1998. – №5. – С. 24–26.

4. Кондрашова О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / О.Г. Кондрашова, М.Н. Назарова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2004. – №2. – С. 19. EDN TWVUMF

5. Лбашева Л.П. Учет анизотропии свойств проката при оценке прочности элементов стальных конструкций, в том числе в условиях эксплуатации при низких климатических температурах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.П. Лбашева. – М., 1996. – 23 с. EDN ZLAZET

6. Браун У. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации / У. Браун, Д. Строули. – М.: Металлургия, 1972. – 248 с.

7. Определение критических коэффициентов интенсивности деформаций при статическом нагружении / Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.М. Соколов [и др.] // Механика катастроф. Определение характеристик

трещиностойкости конструкционных материалов: методические рекомендации МР 11–01. – М.: ФЦНТП ПП «Безопасность»: Ассоциация КОДАС, 2001. – Т. 2. – С. 130–142.

8. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

9. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 840 с.

10. Смирнов В.И. Некоторые проблемы оценки динамической трещиностойкости конструкционных сталей / В.И. Смирнов, Т.А. Кнопина, С.С. Майер // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – С. 428–435.

11. Гальчун И.А. Циклическая трещиностойкость высокопрочных сталей, склонных к водородному охрупчиванию, в коррозионной среде / И.А. Гальчун, К.Е. Садкин, Е.Д. Назарова // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – №2. – С. 126–131. DOI 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-126-131. EDN VOZQQM

12. Оценка необходимости применения различных технологических процедур при выращивании усталостной трещины в образцах / Е.Д. Назарова, В.Ю. Филин, К.Е. Садкин [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021. – №2. – С. 114–120. DOI 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-114-120. EDN IPSRXM

13. Определение критической величины раскрытия трещины (ctod) по испытаниям образцов на трехточечный изгиб / В.Н. Кожин, В.И. Астафьев, А.В. Иоффе [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2021. – №3 (13). – 17 с.

14. Швечков Е.И. Анизотропия механических свойств и характеристик трещиностойкости листов из алюминиевых сплавов / Е.И. Швечков // Технология легких сплавов. – 2015. – 13 с.

15. Остсемин А.А. Влияние деформационной анизотропии на пластическую зону в вершине трещины при двухосном нагружении / А.А. Остсемин //

Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – №2. – 10 с. EDN
LACBOV