

УДК 539.3

О влиянии коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала при вершине трещиновидного дефекта

Шакиртов М.М.

Сибирский государственный университет путей сообщения,

ул. Дуси Ковальчук, 191, Новосибирск, 630049, Россия

e-mail: legion-mpf@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается связь коэффициента асимметрии внешней нагрузки, действующей на конструкцию и характеристики цикла, которым нагружен материал образца в области, примыкающей к вершине трещиновидного дефекта. Численно исследовано нагружение пластины с таким дефектом знакопостоянным циклом с различными коэффициентами асимметрии. Показано, что, независимо от значения коэффициента асимметрии внешней нагрузки, в окрестности вершины трещиновидного дефекта реализуется симметричный цикл нагружения с нарастающей от цикла к циклу амплитудой. Скорость нарастания амплитуды тем меньше, чем ближе значение коэффициента асимметрии внешней нагрузки к единице.

Ключевые слова: трещиновидный дефект, циклическое нагружение, коэффициент асимметрии, пластическая зона, концентрации напряжений.

Введение

Известно, что развитие усталостной трещины (а значит и долговечность инженерных сооружений) зависит от характеристик цикла нагружения [1], геометрии концентраторов напряжений, структуры и свойств материала и других параметров. В настоящее время активно исследуются вопросы длительной прочности металлов [2] и композитных материалов с концентраторами напряжений различного вида [3]. В настоящей работе рассматривается влияние коэффициента асимметрии внешней нагрузки на эволюцию напряжённо-деформированного состояния при вершине трещины. Установлено, что предел выносливости при симметричном цикле внешней нагрузки значительно меньше предела выносливости при пульсирующем цикле [4, 5]. Следовательно, и скорость роста усталостной трещины (при одном и том же значении максимального напряжения цикла нагружения образца) при симметричном цикле нагружения будет выше, чем при пульсирующем.

С другой стороны, усталостная трещина, возникшая в процессе циклического нагружения образца, может быть рассмотрена как острый дефект, в вершине которого реализуется упругопластическое деформирование материала [4]. Важно, что при этом зона упругопластического деформирования занимает лишь незначительную область около вершины дефекта, в то время как практически вся конструкция деформируется упруго [5, 6]. Форма пластической зоны, возникшей в

области, примыкающей к вершине усталостной трещины, распределение напряжений и деформаций внутри неё во многом определяет скорость роста [7- 9] и направление развития [10] такой трещины. Очевидно, при циклическом нагружении образца, материал зоны пластического деформирования также испытывает циклическое нагружение. В литературе [11, 12] описан анализ изменения напряженно-деформированного состояния вблизи кругового отверстия и глубокой выточки в пластинке, подверженной циклическому упругопластическому нагружению симметричным циклом растяжения-сжатия. В этих исследованиях напряженно-деформированное состояние фиксировалось в момент достижения внешней нагрузкой максимального растягивающегося значения. Показано, что в результате такого нагружения происходит значительное изменение напряженного состояния на продолжении концентратора. Напряжения на контуре дефекта могут увеличиваться при многократном циклировании на 40–100%. Однако исследований острых дефектов типа трещин: определения напряжений при минимальных значениях внешней нагрузки, влияния коэффициента асимметрии внешней нагрузки на напряженно-деформированное состояние областей, примыкающих к вершинам концентраторов, в этих работах не приводится.

В настоящей статье анализируется связь характеристик цикла внешней нагрузки и цикла нагружения области, примыкающей к вершине усталостного дефекта.

Расчетная модель. Задача решалась численно с использованием метода конечных элементов. Рассматривалось осевое растяжение прямоугольной пластинки размерами 100 мм на 200 мм.

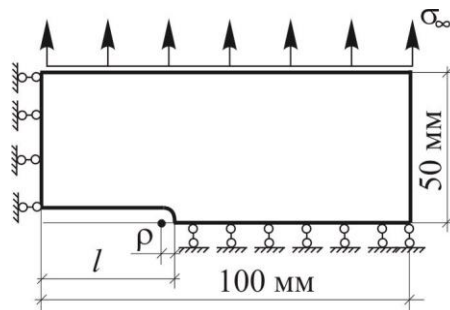
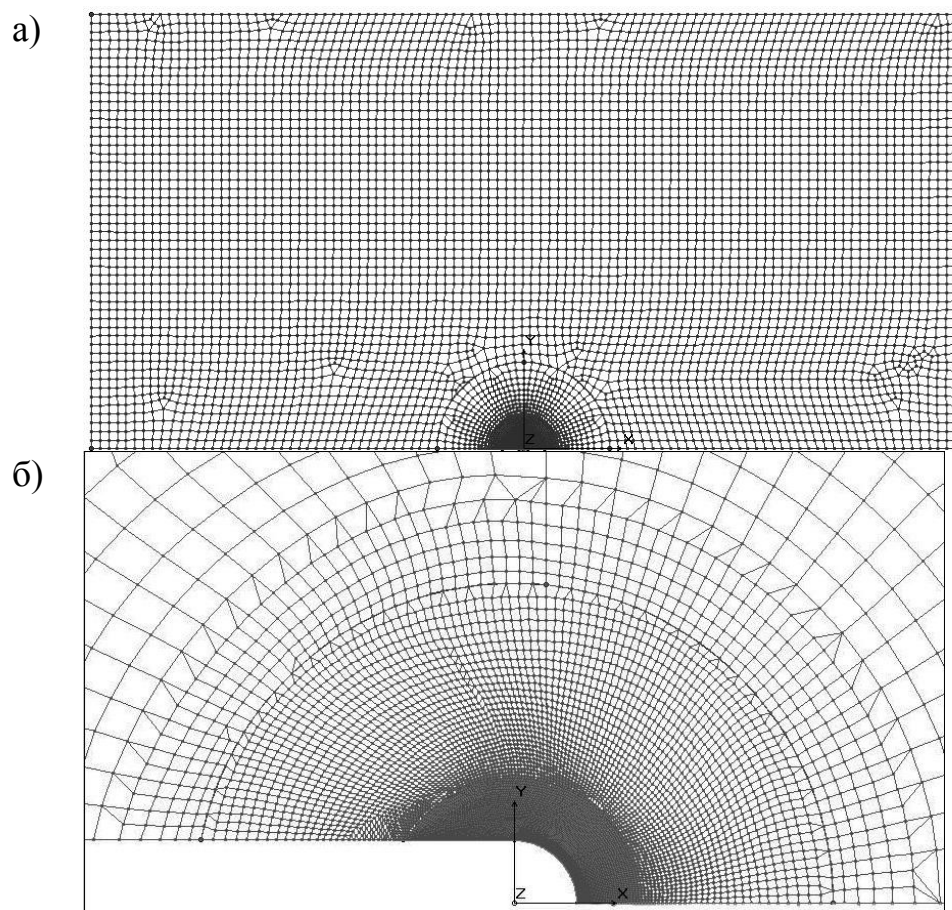


Рис. 1. Расчетная схема пластинки.

Пластина располагает центральным разрезом, ориентированным вдоль длинной стороны. Размеры разреза: длина $2l=100$ мм, ширина 0,2 мм. Концы разреза очерчены по окружности радиусом $\rho=0,1$ мм. Нагружение осуществлялось вдоль длинной стороны нагрузкой перпендикулярно направлению разреза. Так как эта пластина имеет две оси симметрии, расчетная модель представляет четверть пластины с опиранием, как это показано на рис. 1.

Материал пластинки имеет модуль продольной упругости $E=200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu=0,3$; условный предел текучести $\sigma_{0,2}=355$ МПа; диаграмма растяжения материала аппроксимируется билинейной функцией, тангенциальный модуль текучести $E_T=1540$ МПа. Задача решалась с учетом появления больших деформаций. Предполагалось, что пластинка находится в условиях плоского напряженного состояния. Материал пластины подчиняется изотропному упрочнению, тем самым учтено такое его свойство как циклическое упрочнение [5, 6].

Образец нагружается циклически меняющейся нагрузкой. Было рассмотрено шесть вариантов загрузки: минимальные напряжения цикла для них принимались $\sigma_{\min}=0, 20, 40, 60, 80, 90$ МПа, а максимальные напряжения σ_{\max} неизменны и равны 100 МПа для всех вариантов. Таким образом, исследовалось нагружение образца циклами, имеющими коэффициенты асимметрии $r=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,9$.



в)

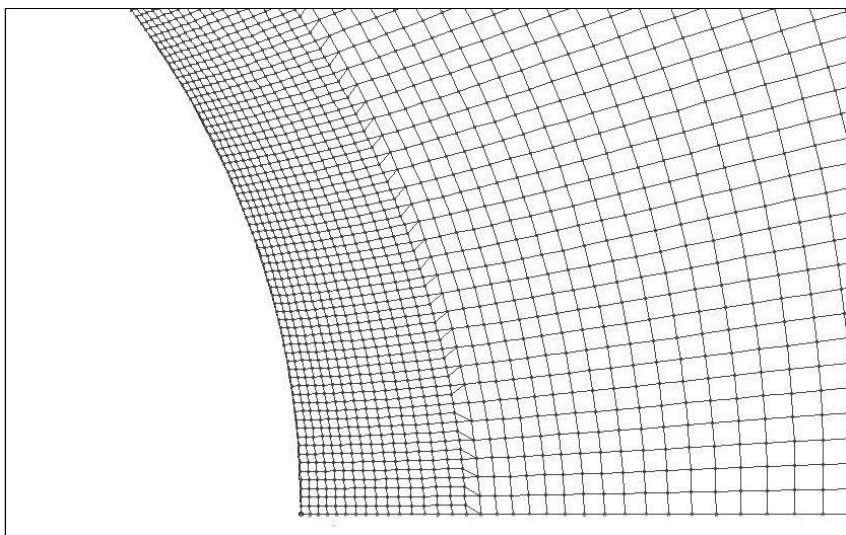


Рис. 2. Вид конечноэлементной модели

а – общий вид модели,

б – область модели, примыкающая к вершине разреза,

в – область модели непосредственно перед вершиной разреза.

Необходимость исследования области образца, непосредственно примыкающей к вершине трещиновидного дефекта, с радиусом весьма малым по отношению к габаритным размерам образца, диктует особый алгоритм построения конечноэлементной модели: в разных областях пластинки размеры конечного элемента должны существенно различаться друг от друга, сгущаясь к вершине дефекта. Для этого был использован принцип вложенных областей: линейные размеры конечного элемента в соседних областях различались в 2-4 раза [13] (см. рис. 2).

Оценка достоверности расчетов. Специфическое построение конечноэлементной модели с существенным сгущением сетки перед вершиной трещиновидного разреза, необходимость решения нелинейной задачи – вычисление

упругопластических напряжений, с учетом появления больших деформаций, требует особого подхода к оценке достоверности полученных результатов. Для этого используется известное соотношение, полученное Нейбером [14]:

$$k_e^2 = k_\sigma \cdot k_\varepsilon, \quad (1)$$

где $k_e = \frac{\sigma_e}{\sigma_{nom}}$ – коэффициент концентрации напряжений в предположении, что

материал образца деформируется линейно, σ_e – напряжения, рассчитанные в вершине концентратора в предположении, что материал образца подчиняется закону Гука во всем диапазоне нагрузок вплоть до разрушения;

$k_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{nom}}$ и $k_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{nom}}$ – коэффициенты концентрации соответственно

для напряжений (σ) и деформаций (ε), если материал деформируется нелинейно (не упруго);

σ_{nom} , ε_{nom} – соответственно средние напряжения и деформации, действующие в ослабленном сечении образца. Заметим, что в рассматриваемом случае в этом сечении с учетом ослабления $\sigma_{nom} = 2 \cdot 100 = 200$ (МПа). То есть уровень внешней нагрузки таков, что номинальные напряжения меньше предела текучести, следовательно, $\sigma_{nom} = E \cdot \varepsilon_{nom}$.

Выразив коэффициенты концентрации через напряжения и деформации, перепишем соотношение (1) в следующем виде:

$$\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{nom}} \right)^2 = \frac{\sigma}{\sigma_{nom}} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{nom}} = \frac{\sigma}{\sigma_{nom}} \cdot \frac{E\varepsilon}{\sigma_{nom}}.$$

Откуда

$$\sigma_e = \sqrt{E\sigma\varepsilon}. \quad (2)$$

Равенство (2) позволяет оценить точность численного расчета упруго-пластической задачи с концентраторами напряжений. Левая часть – это упругие напряжения, которые могут быть получены с использованием известных соотношений, например, формулы Нейбера [15]:

$$\sigma_e = k_e \sigma_{nom} = \left(1 + 2\sqrt{\frac{l}{\rho}}\right) \cdot \sigma_{nom}.$$

Для рассматриваемой задачи

$$\sigma_e = 200 \cdot \left(1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{50}{0,1}}\right) = 9144 \text{ (МПа)}.$$

Правую часть равенства (2) просчитаем, используя данные численного расчета упруго-пластической задачи. В конце первого полуцикла первого цикла нагружения, когда уровень внешней нагрузки на образец достиг максимального значения, для модели, представленной на рис. 1, численно были просчитаны величины напряжений и деформаций в точке модели, совпадающей с вершиной трещиновидного дефекта: $\sigma=1049$ МПа, $\varepsilon=0,440$. Тогда

$$\sqrt{E\sigma\varepsilon} = \sqrt{2 \cdot 10^5 \cdot 1049 \cdot 0,44} = 9608 \text{ (МПа)}.$$

Сниже ближе к точному, получаем погрешность:

$$\left| \frac{9144 - 9608}{9144} \right| \cdot 100\% = 5,07\%.$$

Такая погрешность для упругопластического расчета считается удовлетворительной.

Результаты расчетов. В процессе численной реализации нагружения прямоугольной пластинки, имеющей центральный трещиновидный разрез, в вершине дефекта для циклов внешней нагрузки, имеющих разный коэффициент асимметрии (r), были определены напряжения, действующие вдоль направления действия нагрузки σ_y (см. таблицу 1).

Результаты расчётов

№ цикла	$r=0$	$r=0,2$	$r=0,4$	$r=0,6$	$r=0,8$	$r=0,9$
1	1040	1050	1050	1040	1040	1045,544
	-1190	-1140	-1100	-1050	-517	265,4674
2	1290	1200	1130	1070	1020	1031,319
	-1390	-1270	-1170	-1070	-527	260,124
3	1490	1330	1200	1090	1030	1041,058
	-1570	-1390	-1240	-1100	-529	259,7478
4	1660	1440	1270	1100	1030	1040,901
	-1740	-1500	-1300	-1110	-530	259,61
5	1820	1550	1330	1130	1030	1040,906
	-1890	-1600	-1350	-1131	-530	259,5298
6	1970	1640	1380	1140	1030	1040,913
	-2030,54	-1690	-1400	-1150	-531	259,5318
7	2100	1730	1430	1160	1030	1040,91
	-2160	-1780	-1460	-1170	-531	259,524
8	2220	1820	1480	1180	1030	1040,909
	-2280	-1860	-1500	-1190	-531	259,5234
9	2340	1900	1520	1190	1030	1040,909

	-2390	-1930	-1550	-1200	-531	259
10	2450	1970	1570	1210	1030	1040

Было просчитано 10 циклов. В таблице приведены значения напряжений σ_y в мегапаскалях в конце каждого полупериода нагружения: в моменты, когда внешняя нагрузка достигала максимального значения $\sigma_{\max}=100$ МПа и шести минимальных значений $\sigma_{\min}=0, 20, 40, 60, 80$ и 90 МПа, что соответствует значениям коэффициентов асимметрии $r=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ и $0,9$. Если для любого расчета, например для внешней нагрузки с коэффициентом асимметрии $r=0,4$, построить график изменения экстремальных значений напряжений σ_y на каждом цикле нагружения, то получаем зависимость, представленную на рис. 3. Отчетливо видно, что в вершине трещиновидного дефекта реализуются знакопеременный цикл нагружения с нарастающей от цикла к циклу амплитудой. Обращает на себя еще один интересный факт. Если на графике, представленном на рис. 3, отложить абсолютные значения напряжений σ_y , просчитанные в точках минимума и максимума, то все они будут располагаться на пунктирной линии (линии экстремумов).

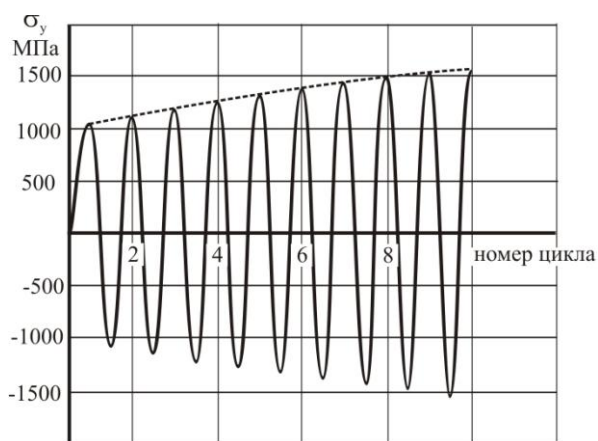


Рис. 3. Изменение напряжений в области, примыкающей к вершине трещиновидного дефекта, при циклическом нагружении образца ($r=0,4$).

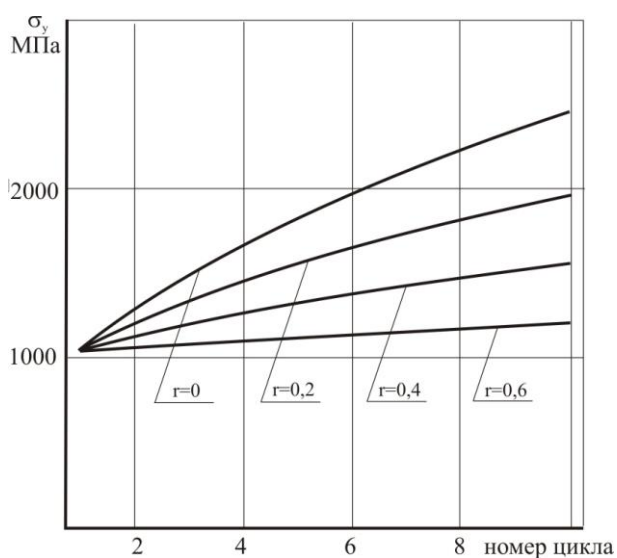


Рис. 4. - Линии экстремумов напряжений σ_y , для разных значений коэффициента асимметрии внешней нагрузки.

Следовательно, можно утверждать, что рассматриваемый цикл нагружения является симметричным. Заметим, что при этом цикл внешней нагрузки является знакопостоянным и изменяется по закону $\sigma_{\max}=100$ МПа, а $\sigma_{\min}=40$ МПа.

Тот же характер цикла нагружения в области, примыкающей к вершине трещиновидного дефекта, будет наблюдаться и для вариантов внешних циклов

нагружения с коэффициентами асимметрии $r=0; 0,2; 0,6$. Во всех случаях реализуется симметричный цикл с нарастающей амплитудой. Только скорость нарастания амплитуды будет разная. Чем больше значение коэффициента асимметрии, тем с меньшей скоростью будут происходить этот процесс. На рис. 4 представлены линии экстремумов для циклов нагружения с $r=0; 0,2; 0,4; 0,6$.

Интересно, что если внешняя нагрузка имеет коэффициент асимметрии $r=0,8; 0,9$, то характер циклических напряжений в области, примыкающей к вершине трещиновидного дефекта существенно изменяется (см. рис. 5, 6).

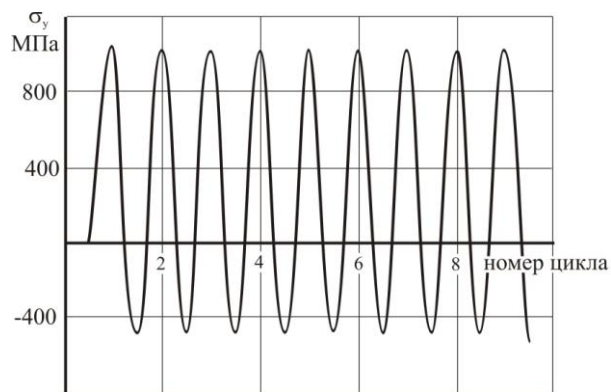


Рис. 5. Изменение напряжений в области, примыкающей к вершине трещиновидного дефекта, при циклическом нагружении образца ($r=0,8$).

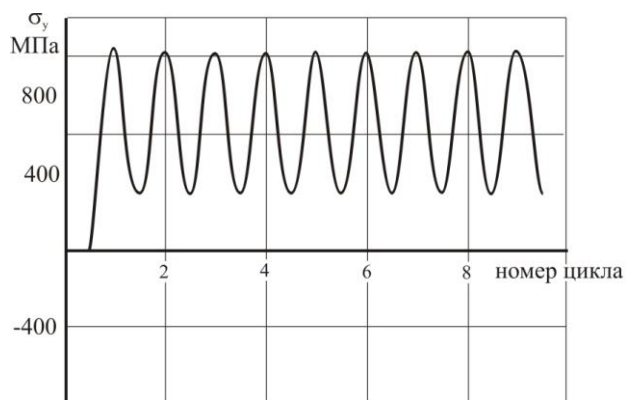


Рис. 6. Изменение напряжений в области, примыкающей к вершине трещиновидного дефекта, при циклическом нагружении образца ($r=0,9$).

Цикл нагружения в материале, примыкающем к вершине дефекта, уже несимметричный с постоянной амплитудой. При $r=0,9$ этот цикл является знакопостоянным. Эти факты можно объяснить тем обстоятельством, что предлагаемые параметры внешней нагрузки исключают обратную пластичность материала при разгрузке. Начиная со второго цикла, весь материал пластинки деформируется упруго.

Выводы. При любом коэффициенте асимметрии внешней нагрузки, действующей на пластинку с трещиновидным дефектом, в материале, примыкающем к вершине дефекта, реализуется симметричный цикл нагружения с возрастающей от цикла к циклу амплитудой. Заметим, что такие же эффекты замечены и в случае, если пластинка нагружается пульсирующими сжимающими напряжениями [16, 17]. Скорость нарастания амплитуды тем меньше, чем ближе значение коэффициента внешней нагрузки к единице. При некотором значении коэффициента асимметрии достаточно близком к единице, в процессе разгрузки образца, в любой точке образца исчезает обратная пластичность. Весь материал деформируется упруго, в материале, примыкающем к вершине трещиновидного дефекта, реализуется несимметричный цикл с постоянной амплитудой.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 16-08-00483

Библиографический список

1. Трощенко В.Т. Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: - Киев, Наукова думка, 1987. – 175 с.
2. Кузнецов Е.Б. Леонов С.С. Математическое моделирование чистого изгиба балки из авиационного материала в условиях ползучести // Труды МАИ, 2013, № 65: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35927>
3. Ендогур А.И. Кравцов В.А. Напряженное состояние композиционной панели в зоне отверстия // Труды МАИ, 2013, № 64: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=36558>
4. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
5. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов – М.: Metallurgia, 1990. – 623 с.
6. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Metallurgia, 1980. - 240 с.
7. Голуб В.П., Плащинская А.В. О влиянии концевой пластической зоны на рост усталостных трещин в изотропных пластинках при одноосном растяжении-сжатии // Теоретическая и прикладная механика. 2003. № 38. С. 91-96.
8. Antunes F.V. A numerical study of plasticity induced crack closure under plane strain conditions / F. V. Antunes, F. G. Chegini, R. Branco, D. Camas // International Journal of Fatigue. – 2015. – No. 71. – pp. 75-86.

9. Шабанов А.П. Возможная модель развития усталостной трещины в упрочняющихся материалах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №5. С. 40-47.
10. Yates J.R. Crack paths under mixed mode loading / J. R. Yates, M. Zanganeh, R. A. Tomlinson, M. W. Brown, F. A. Garrido // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – No. 75. – P. 319-330.
11. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. – М.: Издательство Московского университета, 1965. - 264 с.
12. Кишкин Б.П. Конструкционная прочность материалов. – М.: Издательство Московского университета, 1976. – 184с.
13. Шакиртов М.М., Шабанов А.П., Корнев В.М. Построение диаграмм разрушения для пластин с трещиновидным дефектом на основе необходимых и достаточных критериев // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. №2. С. 163-170.
14. Нейбер Г. Теория концентрации напряжений в призматических стержнях, работающих в условиях сдвига, для любого нелинейного закона, связывающего напряжения и деформации // Механика. 1961. № 4. – С. 117-130.
15. Neuber G. Kerbspannungslehre: Grundlagen für Genaue Spannungsrechnung / G. Neuber. – Springer-Verlag. – 1937.
16. Кутовой В.П., Шабанов А.П., Шакиртов М.М. Исследование напряженно-деформированного состояния вершины усталостной трещины в головке рельса // Известия Транссиба. 2013. №1 (13). С. 89-94.

17. Шабанов А.П. О механизме роста усталостной трещины в поле внешних сжимающих напряжений // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46. № 6. С. 108-115.