

СВОЙСТВА НА СТОМАНИ ЗА ТРЪБОПРОВОДИ ОТ АЕЦ СЪС ЗАРОДЕН ДЕФЕКТ В СТЕНАТА НА ТРЪБАТА

Татяна Авджиева
tavdjieva@phys.uni-sofia.bg

**Софийски университет „Климент Охридски”
София, Джеймс Баучер 5
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: пукнатина, тръба, аец, дължина на пукнатина, пукнатиноустойчивост

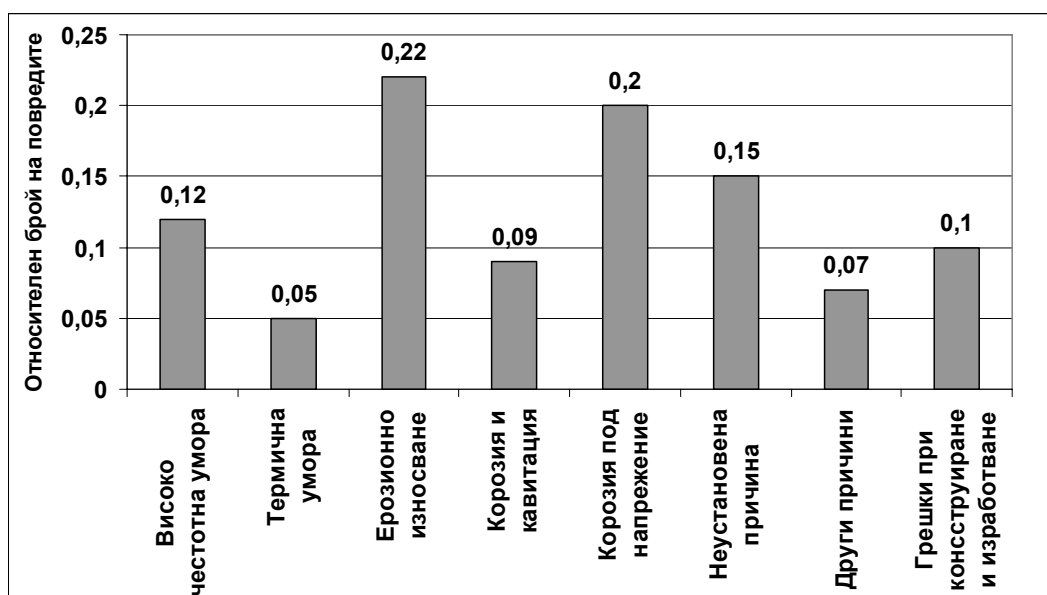
Резюме: Изследването на свойствата на метала за тръбопроводи, установяването на граничната дебелина на тръбата в мястото на възникнал вече дефект, е важен момент в системата от мероприятия за обезпечаване на надеждна експлоатация на втория контур на АЕЦ. Обект на настоящата разработка е анализирането на граничната дебелина на 3D дефект в стената на тръба от охладителната система, както и на промените от наличието на възникналия дефект напрежения и деформации, рефлктиращи върху пукнатиноустойчивостта на материала.

Въведение

Определянето на остатъчния ресурс и пукнатиноустойчивостта на опасните техногенни системи при отчитане на дългосрочната им експлоатация е особено сложен научен проблем. По настоящем, представите за влиянието на различни фактори, като вътрешно налягане на флуида, ерозия, корозия и умора на материала върху кинетиката, механизма и морфологията на процесите на деформиране и разрушаване на тръбните конструкции се намират на стадия на установяване и откриване. Отсъства единна научна концепция, която да описва физичната природа на зависимостта на механичните свойства на материала от продължителността на експлоатация. Няма достатъчно добра експериментална база за оценяване на служебните свойства на тръбопроводите и материала, от който са изработени. В това отношение особено ценни са сведенията за изменението на пукнатиноустойчивостта на тръбопроводите по време на тяхната експлоатация. За съжаление, такива данни почти не се намират.

Както е известно, охлаждането на корпуса на реактора на АЕЦ се осъществява чрез непрекъснато подаване на вода или паро-водни смеси в охладителната система. При продължителна експлоатация в тръбопроводите и арматурата на АЕЦ могат да възникнат дефекти, свързани със загуба на материал. Тези дефекти се пораждат под въздействието на различни процеси на умора, корозия, на ерозионно-корозионно износване, на така наречената Flow Accelerated Corrosion (FAC) или под действие на високи механични натоварвания. Много често в областта на възникнал вътрешен или външен дефект настъпва локално изтъняване на стената на тръбата, което може да достигне до милиметър за година [1-5].

На фиг. 1 са показани статистически данни за причините за поява на повреди в тръбопроводите на АЕЦ на САЩ за периода от 1961 до 1996 г. [2]. Видно е, че влиянието на корозионните процеси (> от 50 % от общите повреди) и на умората на метала (~10 %) са основните причини за възникване на повреди в тръбопроводите на АЕЦ.



Фиг. 1. Повреди в тръбопроводите на АЕЦ в САЩ [4]

От други литературни данни [4 и 5] се разбира, че през 70-те години на 20 век в 3 АЕЦ са възниквали средно по 1 произшествие на година, свързани с аварии в тръбопроводите на системата. На тези аварии не е отделяно сериозно внимание, докато не става тежка авария в АЕЦ „Сари-2” - САЩ, при която има и човешки жертви. Аварията е причинена от ерозионна корозия довела до скъсване на коляно на захранващ тръбопровод с диаметър 450 mm при температура на водата 170 °С. За целия срок на експлоатация до 1986 г., когато възниква аварията, този тръбопровод не е бил подлаган на контрол за деградация на свойствата на метала, тъй като проектният му ресурс е бил 40 години. След това освен аварираният блок „Сари – 2” за изследване на тръбопроводите е бил спрян и другият блок на атомната централа „Сари – 1”. В резултат на проведената диагностика се е наложило да бъдат подменени почти 40 повредени участъка от тръбната система.

Аналогични аварии е имало през 1990 в първия и през 1993 г. във втория блок на финландската АЕЦ „Ловииса” [5]. При първата авария се е разрушил тръбопровод с външен диаметър 325 mm и дебелина на стената 18 mm, в мястото под диафрагмата на разходомера на хранващия с вода тръбопровод. Във втория блок аварията е настъпила в мястото след невъзвратния клапан на тръбопровода.

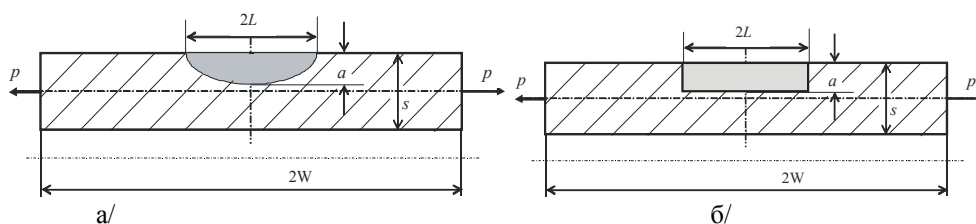
Във времето са установявани многочислени изтънявания на тръбопроводи в Балаковската и в Южно Украинската АЕЦ [4 и 5]. Деграцията на свойствата на материала, от който са изградени тръбопроводите не само намалява общата безопасност на АЕЦ, но и води до много загуби, свързани с ремонт и замяна на повреденото оборудване, не рядко води и до преустановяване на работата на отделни блокове в централите. Ето защо, своевременната диагностика, изследването на деграцията на свойствата на материала, оперативното оценяване на степента на опасност от открити или възможни дефекти, несъмнено биха намалили риска от аварийни ситуации, свързани с дефекти в тръбопроводните системи на АЕЦ. Обаче, много често това е невъзможно и тогава трябва да се разработват аналитични методи за определяне на възможното развитие на зародени в тръбата пукнатини.

Гранични състояния при разрушаване на тръби в АЕЦ

За да се обезпечи надеждната и безопасната работа на атомните електрически централи на етапа на тяхното експлоатиране от съществено значение е диагностиката както на оборудването, така и на тръбопроводите на АЕЦ. Тръбопроводите на АЕЦ се експлоатират в жилаво или квазикрежко състояние и тогава е необходимо при установяване на появили се повреди да се извършва оценка на степента на опасността и прогнозиране на развитието на съответния дефект [2, 6].

Когато се разглежда локален дефект в стената на тръба при приложено натоварване повърхността на тръбата се деформира, като материалът се премества в областта, която заобикаля дефекта – ефектът носи сложното име „теч преди разрушаване) [6]. В този случай, настъпващите повреди се разглеждат като критични и чрез тях се определят преместванията и деформациите на цялата система [1]. Граничните деформации и якостта на материала в повредената тръба зависят както от механичните свойства на материала, така и от формата и размерите на дефекта. Тази концепция представлява класически пример за използването на приложната механика на разрушаване при пресмятането на тръби, работещи под налягане. Счита се, че окончателното разрушаване се предшества от изтичане на флуида през относително устойчиво развиваща се пукнатина. Тази пукнатина се нарича още проникваща, тъй като се развива през цялото сечение на стената на тръбата.

На фиг. 1 е показан сегмент от цилиндрична тръба, която е подложена на действието на вътрешно налягане q . В тръбата се намира зароден вече дефект (пукнатина), разположен в осево направление. Най-често при пресмятанията се разглеждат дефекти с правоъгълна или параболична форма.



Фиг.1. Сегмент от тръба с външен а/ параболичен и б/ правоъгълен дефект

Напрежението, което възниква в тръба с дефект се изменя в зависимост от дебелината на тръбата $s' = f(h(x))$, където x е размерът на стената, когато в нея има дефект – $x = s - a$ (фиг. 1).

$$(1) \quad \sigma_t = \frac{P}{bh(x)}, \text{ и без дефект - } \sigma_t = \frac{P}{bs}, \text{ където } b \text{ - ширина на}$$

разглеждания сегмент.

Еластично-пластичната деформация е съсредоточена в повредената част на тръбата. Възможно е в даден момент напрежението в слабото сечение да достигне стойности, равни на якостта на опън на материала в неповредената част. Това състояние съответства на равновесието на силите във формула 2 [1]:

$$(2) \quad p = Rm(s - a) = \sigma_t s.$$

При тези условия може да се намери критичният размер на пукнатината (формула 3):

$$(3) \quad a_c = s \left(1 - \frac{\sigma_t}{R_m} \right).$$

След това се пресмята критичната стойност K_{Ic} (коэффициент на интензивност на напреженията) при плоско напрегнато състояние за елиптична повърхнина по формула 4:

$$(4) \quad K_{Ic} = \frac{1,12M_k \sigma \sqrt{\pi l}}{\sqrt{Q}},$$

Където l – е половината от дължината на пукнатината. M е корекционен кофициент, предложен в [6] и отчита зависимостта между размера на пукнатината и дебелината на стената. Този коэффициент отчита близостта на свободната повърхност до фронта на пукнатината. Това води до допълнително разтваряне на повърхностната пукнатина и съответно до увеличаване на K_{Ic} . При стойност на отношението $a/2l \approx 0,1 - 0,3$ стойността на $M_k = 1,1$ [6]. Корекционният коэффициент Q отчита наличието на пластична деформация пред фронта на пукнатината. При стойност на отношението $a/2l \approx 0,1 - 0,3$ и $R/R_e = 1$, то – $Q = 1$ [6].

Резултати

На изследване са подложени цилиндрични тръби от често използвани материали за тръбопроводи (таблица 1). Изследвани са тръби с размери $D = 100$ mm с дебелина на стената s от 9 до 15 mm. Разглежданите стомани са с граница на провлачане (R_e) в диапазона от 195 до 390 МПа. Извършени са сериални

пресмятания за критичното напрежение σ_t при дълбочина на дефекта $a = 1$ до 8 mm и за стойността на K_{IC} .

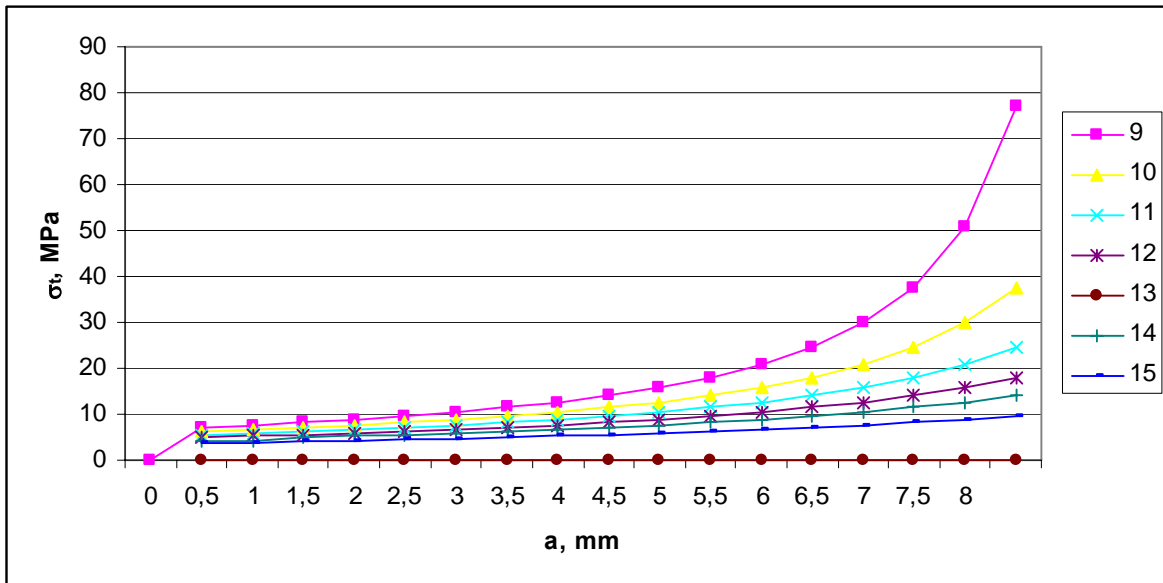
Таблица 1. Стомани, използвани за тръбопроводи в АЕЦ

Стомана	C, %	Граница на провлачане R_e , МПа	Якост на опън, R_m МПа	Относително удължение, A %
20	0,20	195	390	26
15ХСНД	0,15	345	490	21
C55E (09Г2С)	0,10	368	590	34
12Х18Н10Т	0,12	-	530	37
15ХМФА	0,145	390	680	21
17ГС	0,15	320	750	23

На фиг. 5 и в таблица 2 е показана стойността на критичното напрежение σ_t . Стойността на критичното напрежение се увеличава с нарастване на дълбочината на дефекта. В тръбопроводи с по-малка дебелина на стената (крива 9 на фиг. 5) се установява значително нарастване на напрежението до 79 МПа при $a = 8$ mm. Може да се определи, че при всички стойности на s значителното увеличаване на σ_t е след $a_c = 2,5$ mm. Което означава, че след тази стойност се очаква безконтролно развитие на пукнатината - разрушаване на тръбата чрез разкъсване на материала.

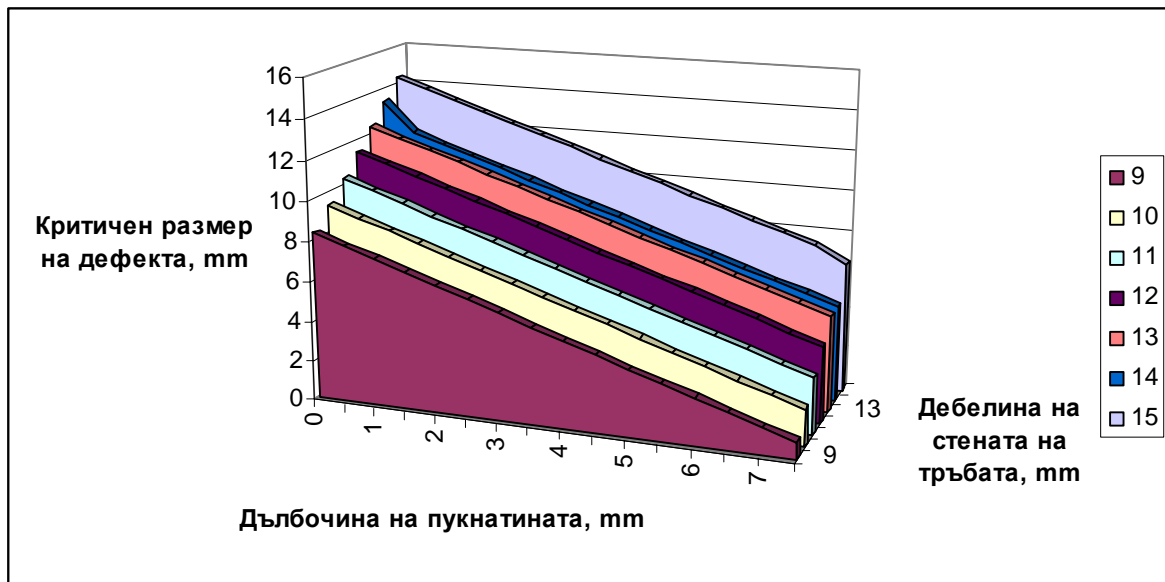
Таблица 2. Стойности на критичното напрежение

Rm, МПа	σ_t , МПа										
	s, mm										
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
390	312	320	334	341	346	351	354	357	360	362	364
490	392	408	420	428	435	441	445	449	452	455	457
518	207	431	444	453	460	466	470	474	478	481	483
530	424	441	454	463	471	477	481	485	489	492	494
540	432	450	462	472	480	486	490	495	498	501	504
580	464	483	497	507	515	522	527	531	535	538	541



Фиг. 5. Зависимост на критичното напрежение σ_c от дебелината на стената $a = 9$ до 15 mm и якостта на опън на материала

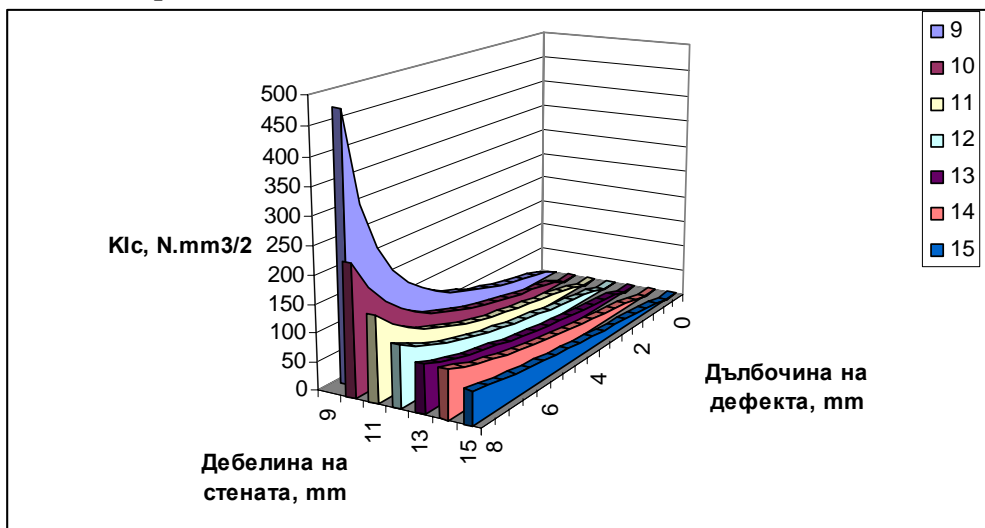
На фиг. 6 се наблюдава стойността на критичния размер на пукнатината, изчислена в зависимост от якостта на опън и критичното напрежение, създадено от наличието на дефект. При стойност на $a_c > 1,8$ до $4,5$ mm (при $s = 9$ до 15) напрежението достига стойността на границата на провлачане и разрушаването протича без пластична деформация в неповредената част във всички разглеждани стомани, независимо от якостта на опън на материала.



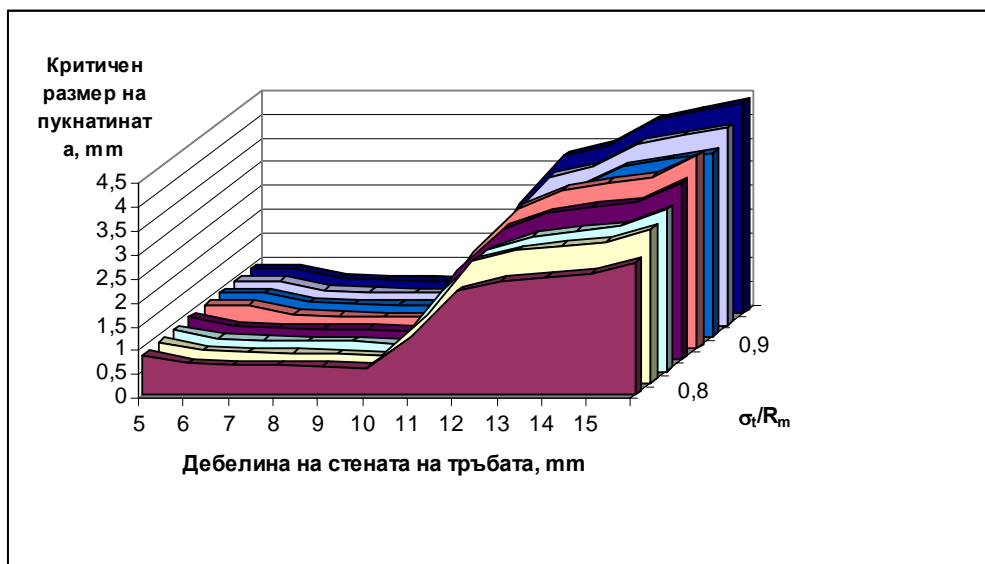
Фиг. 6. Критична дълбочина на пукнатината

След пресмятането на стойностите на K_{Ic} за всяка серия от изследвани пукнатини и материали, резултатите са показани графично на фиг. 7. Изчисленията са направени при стойност на дължината на пукнатината $\ell = 20$ mm. На фиг. 7 може да се установи, че величината L_{Ic} може да служи като критерий за реалното нарастване на пукнатината. Критерият L_{Ic} така също покрива различията, които могат да възникнат в конкретна ситуация. Различните

криви в диаграмата се отнасят за тръба с диаметър 100 mm от стомани с якост на опън в диапазона от 390 до 780 МПа и наличие на дефект с дебелина до 8 mm в стената на тръбата. С увеличаване на якостта на стоманата критичният размер K_{Ic} се увеличава. В случая устойчиво развиващи са пукнатините до дълбочина на дефекта 1,8 mm за дебелина на стената 9 mm и 4,5 mm при дебелина на стената – 15 mm. Над тази стойност пукнатината би се развила бързо, неустойчиво, самопроизволно, което може да предизвика окончателно разрушаване на тръбата.



Фиг.7. Зависимост между K_{Ic} и дълбочината на дефект в тръба с различна дебелина на стената



Фиг. 8. Влияние на якостта на опън върху критичния размер на пукнатината

Може да се установи, че a_c се запазва под 1 mm до дебелина на стената 10,5 mm (фиг. 8), независимо от якостта на материала. След това стойността нараства значително. Вероятно по-голямата пукнатиноустойчивост ($a_c = 2,7$ до 4,9 mm) се дължи на по-голямата носеща способност на материала в по-дебелата стена, а вероятно и на по-голяма пластична деформация при високи външни напрежения. Очевидно, това е възможно при структури, които съчетават едновременно якостни и пластични свойства.

За да се предотврати безконтролното развитие на вече зародена пукнатина в стената на тръбопровод, трябва за всяка дълбочина на пукнатината да са на лице условия за развитие на пукнатината по механизма на напречно плъзгане. Развитие на пукнатина по метода на разкъсване кореспондират на кривите на фиг.8 с отношение $d/s > 0,85$.

Литература:

- [1] Ван Хайжун, Прочност тръбопроводов АЕЦ, ослабленЫх трехмерными дефектами стенки, дисертационен труд, Московский инженерно-физический институт, 2005
- [2] Истомина Светлана Владимировна, Исследование напряженно-деформированного состояния элементов оборудования ВВЭР и УЛР при тяжелых авариях, связанных с разрушением активной зоны, Московский инженерно-физический институт
- [3] Эрозионно-коррозионный износ оборудования атомных электростанций / В.И. Бараненко, Б.И. Нигматулин, Т.Е. Щедеркина и др. //Атомная техника за рубежом, 1995, № 6, С.9-13
- [4] Захаров М.Н., Лукьянов В.А. Прочность сосудов и трубопроводов с дефектами стенок в нефтегазовых производствах / М.:ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 216 с.
- [5] Степанов И.А. Мониторинг остаточного ресурса оборудования АЭС по показателям коррозионно-механической прочности конструкционных материалов //Теплоэнергетика, 1994, № 5, С. 36-39.
- [6] Duffy, A., R. Eiber, W. Maxey, Recent work on flaw behavior in pressure vessels, Practical Fracture, Mechanics for structural Steels, New York and London, 1969
- [7] Георгиев, М., Пукнатиноустойчивост на металите при статично натоварване, Булжест 2000, София, 2005
- [8] Mihovski, I., On the application of the $L_{ic} = (K_{Ic}/\sigma_{ys})$ criterion to fracture of cracked pipes, Engineering Transaction 28, 3, 1980, Polska Akademia Nauk
- [9] Nichols R., Pressure vessel engineering technology, EPCL, 1971