

Section 3 FATIGUE STRENGTH WITH ALLOWANCE FOR THE EFFECT 393
OF MANUFACTURING, DESIGN AND OPERATIONAL FACTORS**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТНОСТИ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ****А.В. Корнилова****PRACTICAL ASPECTS OF THE DETERMINATION
OF THE ALLOWABLE TECHNOLOGICAL DEFECTIVENESS****A.V. Kornilova***ЗАО «Прочность», Москва, Россия*

Abstract. Предлагается при оценке технологической дефектности и составлении карты допускаемых дефектов с целью снижения консервативности расчетных схем и подходов разработать базу математических моделей, максимально приближенных к реальным дефектам, присущим результату применения каждой конкретной технологии. Определение долговечности предлагается проводить с учетом прогнозируемой истории нагружения. Окончательное решение о выбраковке детали по обнаруженной технологической дефектности принимать только после проведения расчетного краш - теста детали с выявленными в реальной конструкции и введенными в модель дефектами.

Технологическая дефектность имеет преимущественно металлургическое и сварочное происхождения и характеризуется случайными факторами – размерами, физическими свойствами, характером распределения, которые в свою очередь определяются особенностями технологических процессов. Эксплуатационная дефектность характеризуется как начальным распределением дефектности, так и эксплуатационными факторами. Установлено, что параметры технологической дефектности распределены преимущественно по закону Вейбулла, в отличие от эксплуатационных дефектов, распределение которых подчиняется логарифмическому нормальному закону распределения [1].

В настоящее время практикуется 3 подхода к определению влияния начальной дефектности на усталостную долговечность крупногабаритных ответственных деталей [1]. В соответствии с этими подходами в потенциально опасные зоны вводится одиночный дефект (минимального размера, поддающегося выявлению существующими методами неразрушающего контроля), вводится случайный одиночный дефект, размер которого принимается по закону Вейбулла и анализируется множественная дефектность (в качестве случайных чисел рассматривается глубина залегания, размер дефектов и расстояние между дефектами). Эти подходы представляют несомненный научный интерес. Однако для практических целей (выявления параметров выбраковки крупногабаритных деталей) требуется карта допустимых дефектов, построенная с учетом прогнозируемой истории нагружения и реальных механических свойств детали. Такая карта накладывается на карту обнаруженных дефектов, и с вероятностью, зависящей от надежности методов неразрушающего контроля, принятых методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и определения механических свойств, делается вывод о возможности эксплуатации исследуемого объекта в предполагаемых режимах. Кроме того, из-за несовершенства существующих методов неразрушающего контроля полезно составить карты возможной дефектности по имеющимся опытным данным для конкретных заводов-изготовителей по всем применяемым технологиям (группам технологий).

При составлении карты допустимых дефектов возможно принять посылки работы [2] и виртуально разбить всю рассматриваемую конструкцию на зоны по уровню математического ожидания напряжений с присвоением им ранга по потенциальной опасности развития усталостных трещин и последующего разрушения. Распределение по конструкции технологической дефектности может привести к перераспределению классов опасности разрушения и существенно снизить планируемое на этапе проектирования значение долговечности. Это связано с тем, что появление дефектов в рассматриваемых потенциально опасных зонах приводит к непропорциональному изменению уровня НДС. Для каждой ранжированной зоны крупногабаритных деталей допустимым является технологический дефект, размер которого определяется по критерию образования усталостных трещин критического размера. Для более адекватной оценки повреждаемости рассматриваемый виртуальный дефект по своим характеристикам должен максимально приближаться к реальным дефектам, неизбежно присущим результату применения любой технологии. В соответствии с этим каждому типу технологического дефекта должна быть разработана своя математическая модель.

Основным способом получения крупногабаритных базовых деталей является литье, характеризующееся множеством разновидностей технологической дефектности. На рис. 1 показана поверхность литой крупногабаритной детали с дефектами (фотография сделана при выполнении экспертизы технического состояния объекта специалистами ЗАО «Прочность»).



Рис. 1. Зачищенная поверхность литой крупногабаритной детали с дефектами типа подкорковый пузырь (1), усадочная раковина (2) и трещина (3)

Доказано (например, [3]), что наибольшее влияние оказывает одиночный случайный дефект. Поэтому в опасные зоны виртуально вводим одиночный объемный дефект и определяем его допустимые габариты. Объемный виртуальный дефект является математической моделью следующих внутренних дефектов отливки:

- Усадочная раковина. Внутренняя усадочная раковина может содержать неметаллические включения. Часто зона, прилегающая к усадочной раковине, обогащена углеродом и ликвирующими примесями (серой) и фосфором.
- Пузырь в виде полости (округлой или продолговатой), образующийся в результате выделения газов при кристаллизации. В пузырях так же могут встречаться неметаллические фазы, заполняющие определенные участки пузыря и отлагающиеся на

его стенках.

– U - образная ликвация (усадочная полость).

В качестве математической модели этих дефектов принимается полость в виде эллипсоида вращения, расположенная наиболее неблагоприятным с точки зрения усталостной прочности образом (большая полуось перпендикулярна максимальному растягивающему напряжению – эквивалентному или 1- ому главному). Такой дефект вводится во все ранжированные по уровню математического ожидания НДС зоны конечно-элементной модели с наложением граничных условий по равенству нулю нормальных и касательных напряжений на внутренней поверхности дефекта. На рис. 2 показана кривошипный пресс силой 1 МН, конечно-элементная модель сварно-литой станины в деформированном состоянии и объемный дефект в зоне потенциально опасной по зарождению усталостных трещин – верхнем переходе (I).

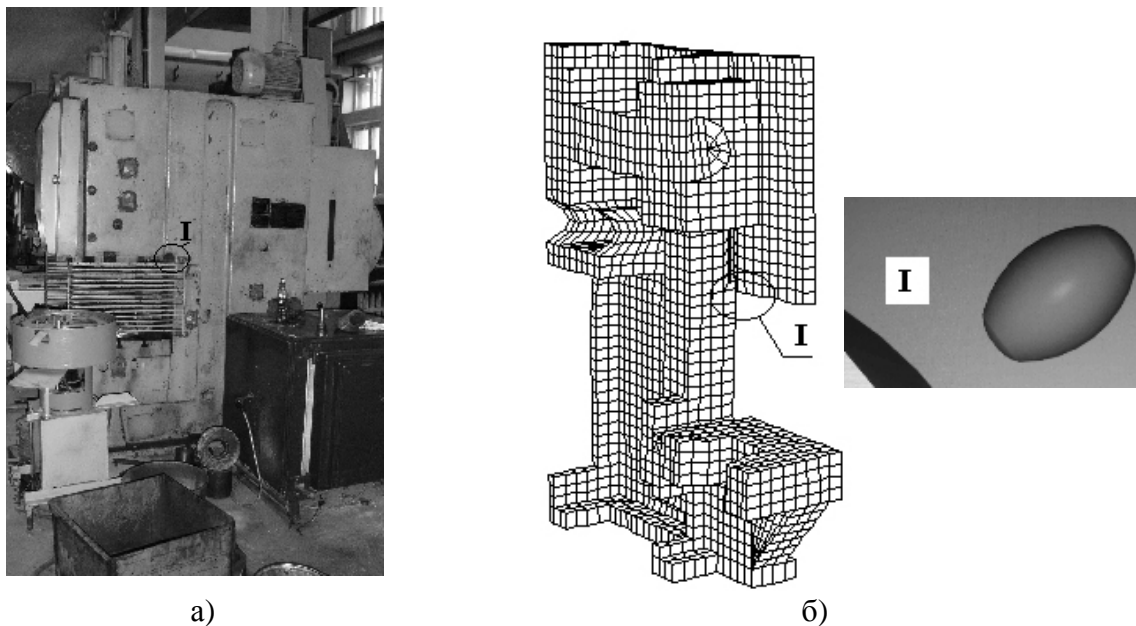


Рис. 2 а – кривошипный пресс силой 1 МН, б – конечно-элементная модель половины симметричной конструкции станины пресса с главным валом, в – объемный дефект в наиболее опасной зоне (верхнем переходе) - увеличено, для удобства восприятия не показана конечно-элементная сетка и удалена из визуализации часть стойки станины со 2-ой половиной дефекта

Дефект такого типа является опасным по критерию роста усталостных трещин. При зарождении у его поверхности трещины размера l , эффективная длина трещины будет составлять $l_{\text{э}} = l + d + r_p$ (м), где d – длина большой полуоси эллипсоида, r_p – радиус пластической зоны в вершине трещины. Для экспресс – оценки дефектов такого типа допустимо применять графики коэффициентов концентрации напряжений по брутто-сечению. Коэффициент концентрации напряжений по брутто-сечению позволяет комплексно учесть концентрацию напряжений относительно сопротивляющейся части дефектной зоны (нетто-сечение) и рост напряжений из-за эффекта ослабления сечения в результате внедренного дефекта. Таким образом, при прочих равных условиях недопустимыми дефектами могут оказаться дефекты относительно малого размера (например, при изгибе $d/H < 0,2$, H – наименьший габарит ранжированной зоны) из-за большой концентрации и большого градиента напряжений и дефекты относительно большого размера ($d/H > 0,4$) из-за ослабления сечения. Кроме того, как показывает практика усталостные характеристики в районе дефекта снижаются еще и из-за плохого качества внутренней поверхности самого дефекта. Согласно [4] для коэффициента,

снижающего предел выносливости и зависящего от качества поверхности можно записать

$$\varepsilon_{mo} = 1 - 0,22 \lg R_z \left(\lg \frac{\sigma_e}{20} - 1 \right),$$

где R_z - параметр шероховатости внутренней поверхности дефекта (принимается 100 мкм); σ_B - предел выносливости материала, МПа.

В связи с вышесказанным, величину допустимого единичного дефекта будем определять по условию не зарождения магистрального дефекта:

$$\sigma_{-1д} \geq \sigma_{a пр}, \quad (1)$$

где $\sigma_{-1д}$ - предел выносливости детали с учетом и всех понижающих факторов (в том числе масштабного) при коэффициенте асимметрии цикла $R = -1$, $\sigma_{a пр}$ - амплитудное значение напряжения, приведенное к симметричному циклу, с учетом влияния постоянных нормальных напряжений, МПа.

Наиболее сложно выявляемой дефектностью отливок является пористость. Только радиационный и вихретоковый методы позволяют с 60 - 80 % вероятностью определить наличие и дислокацию пористой зоны. Пористая зона представляется случаем среды с различающимися свойствами составляющих фаз – твердого каркаса и поровой фазы. В работе [5] предлагаются следующее соотношение для изолированных пор

$$S(P, r) = \frac{S_{eff}}{S} = \frac{1 - f^2(P)}{1 - f^2(P) + f^3(P) + f^3(P) \frac{x}{r}},$$

где S_{eff} - эффективное поперечное сечение твердой фазы, характеризующее реально нагруженную поверхность твердого тела, S - площадь номинального сечения, P - пористость $P = 1 - \frac{\rho}{\rho_K}$ (ρ, ρ_K - плотность пористого и компактного материала

соответственно), $f(P) = P^{1/3}$, для изолированных пор (для металлов средний размер пор колеблется от 15 до 30 мкм, пористость соответственно от 0,05 до 0,35), r - радиус изолированной поры, мкм, x - величина компактной области, определяемая радиусом пор и расстоянием между ними, мкм.

При определении величины x принималось допущение, что существует некоторая критическая величина компактной области, определяемая параметрами акустической волны, при которой при прохождении ультразвука между порами теряется четкость отраженного сигнала. Окончательно [5]:

$$x \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} & r > \frac{2\pi}{\lambda} (f^{-1} - 1)^{-1}, \\ r(f^{-1} - 1) & r \leq \frac{2\pi}{\lambda} (f^{-1} - 1)^{-1}, \end{cases}$$

где λ - длина волны, мкм (задается прибором).

Для соотношения модулей упругости дефектного E и модуля упругости компактного материала E_k по [5] принимается следующее выражение

$$\frac{E}{E_k} = \left(\frac{S_{eff}}{S} \right) (1 - P)$$

До конца невыясненной является проблема поведения коэффициента Пуассона μ в зависимости от пористости и среднего размера пор. Экспериментальные данные различных исследователей говорят о некотором уменьшении этого параметра с ростом пористости. Для практических расчетов и в связи с тем, что пористость присуща не всему объему исследуемой детали принимаем допущение $\mu = \mu_k$. В результате можно определить во сколько раз увеличатся амплитудные напряжения для участка пористой среды (для растяжения-сжатия). В работе [6] пористость связывается с технологическим локальным параметром затвердевания $G \left(\frac{1}{m} \right)$:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta l \tau_1},$$

где $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$, τ_2 , τ_1 - продолжительность затвердевания металла отливки соответственно в исследуемой зоне отливки и в точке, отстоящей на расстоянии Δl в направлении питания отливки. При соблюдении условия $G > 0,1$ возможно исключение в структуре металла дефектов в виде пор. При равновесной ферритно-перлитной структуре стальных отливок предел прочности слабо зависит от показателей пористости, а вязкость разрушения предлагается [6] связать с локальным параметром затвердевания следующей зависимостью:

$$K_{IC} = K_{IC \max} \sqrt{9G},$$

где $K_{IC \max}$ - максимальное значение вязкости разрушения по отливке (МПа $\sqrt{м}$).

Кроме объемных технологических дефектов крупногабаритным деталям присущи и двумерные дефекты (внутренние и наружные). Самые распространенные:

- Угловая трещина. Дефект в виде разрыва, который может быть внутри слитка или выходит на поверхность по углам слитка. Возникает в слитках (отливках) большой массы.
- Межкристаллитные трещины. Дефект в виде нарушения сплошности, образующихся по границам кристаллов вследствие усадочных, термических и структурных напряжений.
- Скворечник. Дефект представляет собой раскрывшуюся при деформации поперечную термическую трещину.

Математической моделью таких дефектов может являться несквозные поверхностные (рис. 3) и приповерхностные полуэллиптические трещины, исследованные А.В. Овчинниковым [7, 8]. Обозначив через c длину большей полуоси эллипса и примем, что глубина l дефекта составляет $\frac{2}{3}c$ (рис.3).

Согласно [7], коэффициент интенсивности напряжений для поверхностной трещины составит:

$$K_I = \frac{2 - 0,82 \frac{l}{c}}{\left[1 - \left(0,89 - 0,57 \sqrt{\frac{l}{c}} \right)^3 \left(\frac{l}{t} \right)^{1,5} \right]^{3,25}} \Phi \sigma^* \sqrt{l}.$$

Это выражение справедливо при $l \leq c$ и $l \leq 0,7t$. В точке A: $\Phi = \left[1,1 + 0,35 \left(\frac{l}{t} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{l}{c}}$;
 $\sigma^* = 0,64\sigma_A + 0,36\sigma_B$. В точке B: $\Phi = 1$; $\sigma^* = 0,111(\sigma_A + 5\sigma_B + 3\sigma_D) - 0,4 \frac{l}{c} \times$
 $\times (0,17\sigma_A + 0,21\sigma_B - 0,38\sigma_D) + 0,28 \frac{l}{t} \left(1 - \sqrt{\frac{l}{c}} \right) (\sigma_A - \sigma_D)$.

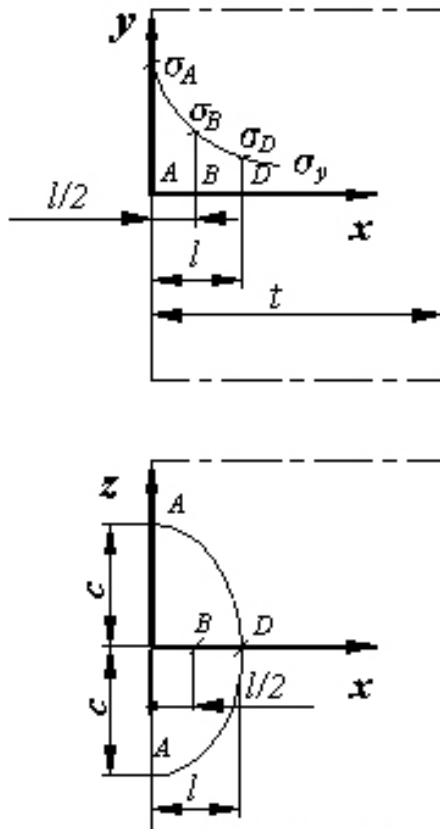


Рис. 3. Схема приповерхностной полуэллиптической трещины

Критерий выбраковки крупногабаритных деталей по технологической дефектности типа трещина принимается:

$$K_I \leq K_{th}.$$

где K_{th} - пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений, при значениях ниже которого трещина не распространяется.

Для окончательного решения вопроса о выбраковке исследуемой детали предлагается проводить краш-тест, т.е. виртуальное моделирование возможных аварийных режимов происходящих за малый период времени. Такой краш - тест возможно провести с помощью LS-DYNA.

Литература

1. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Шокин Ю.И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск.: Наука. 2005. 250 с.
2. Доронин С.В., Бабушкин А.В. Исследование напряженного состояния в области технологической дефектности // Сборник трудов Первой конференции пользователей программного обеспечения CAD – FEM GmbH (Москва, 25-26 апр. 2001 г.) Под ред. Шадского А.С. – М.: Изд-во «Барс», 2002. – С. 101-107.
3. Доронин С.В., Чурсина Т.А. Влияние распределения начальной дефектности на сценарий развития аварийной ситуации // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2004, № 6, С. 99- 104.
4. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 356 с.
5. Головин А.В. Влияние пористости на упругие свойства металлов. Автореферат диссер. на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Барнаул. 1996. 18 с.
6. Ольховик Е.О. Исследование влияния усадочной пористости и параметров структуры на изменение механических свойств в отливках ответственного назначения. из углеродистой стали. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. СПб. 2005. 19 с.
7. Овчинников А.В. Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений K_I для тел с поверхностными трещинами // Проблемы прочности. 1986. № 11. С. 44 – 47.
8. Овчинников А.В. Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений K_I для тел с подповерхностными трещинами // Проблемы прочности. 1986. № 11. С. 41 – 43.