ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

СТБ EN 13445-6-2009

СОСУДЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Часть 6

Требования к конструкции и изготовлению сосудов и элементов сосудов, работающих под давлением, из чугуна с шаровидным графитом

ПАСУДЗІНЫ, ПРАЦУЮЧЫЯ ПАД ЦІСКАМ

Частка 6

Патрабаванні да канструкцыі і вырабу пасудзін і элементаў пасудзін, працуючых пад ціскам, з чыгуну з шарападобным графітам

(EN 13445-6:2009, IDT)

Издание официальное

БЗ 11-2009

Госстандарт
Минск

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.642-98-034.13(083.74)(476) МКС 23.020.30 КП 03 IDT

Ключевые слова: сосуды, работающие под давлением, элементы сосудов, требования к конструкции

Предисловие

Цели, основные принципы, положения по государственному регулированию и управлению в области технического нормирования и стандартизации установлены Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».

1 ПОДГОТОВЛЕН ПО УСКОРЕННОЙ ПРОЦЕДУРЕ научно-производственным республиканским унитарным предприятием «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации» (БелГИСС)

ВНЕСЕН Госстандартом Республики Беларусь

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 27 ноября 2009 г. № 61

3 Настоящий стандарт идентичен европейскому стандарту EN 13445-6:2009 Unfired pressure vessels – Part 6: Requirements for the design and fabrication of pressure vessels and pressure parts constructed from spheroidal graphite cast iron (Сосуды, работающие под давлением. Часть 6. Требования к конструкции и изготовлению элементов сосудов, работающих под давлением, из чугуна с шаровидным графитом).

Европейский стандарт разработан техническим комитетом по стандартизации CEN/TC 54 «Сосуды, работающие под давлением» Европейского комитета по стандартизации (CEN).

Перевод с английского языка (en).

Официальные экземпляры европейского стандарта, на основе которого подготовлен настоящий государственный стандарт, и европейских стандартов, на которые даны ссылки, имеются в Национальном фонде ТНПА.

Степень соответствия – идентичная (IDT)

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

© Госстандарт, 2010

Настоящий стандарт не может быть воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Госстандарта Республики Беларусь

Издан на русском языке

Введение

Настоящий стандарт содержит текст европейского стандарта EN 13445-6:2009 на языке оригинала и его перевод на русский язык (справочное приложение Д.А).

Введен в действие как стандарт, на который есть ссылка в Еврокоде EN 1993-1-8:2005.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

СОСУДЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ
Часть 6
Требования к конструкции и изготовлению сосудов и элементов сосудов, работающих под давлением, из чугуна с шаровидным графитом

ПАСУДЗІНЫ, ПРАЦУЮЧЫЯ ПАД ЦІСКАМ
Частка 6
Патрабаванні да канструкцыі і вырабу пасудзін і элементаў пасудзін, працуючых пад ціскам, з чыгуну з шарападобным графітам

Unfired pressure vessels
Part 6
Requirements for the design and fabrication of pressure vessels and pressure parts constructed from spheroidal graphite cast iron

Дата введения 2010-01-01

1 Scope

This European Standard specifies requirements for the design, materials, manufacturing and testing of pressure vessels and pressure vessel parts intended for use with a maximum allowable pressure, PS, equal or less than 100 bar and shell wall thicknesses not exceeding 60 mm, which are constructed of ferritic or austenitic spheroidal graphite cast iron. The thickness limitation of the shell does not apply to thickness of flanges, reinforcements, bosses etc.

The allowable grades do not include lamellar graphite cast iron grades for ferritic and austenitic grades, which are explicitly excluded from this European Standard because of low elongation and brittle material behaviour, which requires the use of different safety factors and a different approach.

NOTE 1 Austenitic spheroidal graphite cast iron grades are principally used for high and low temperature applications and for their corrosion resistance properties.

NOTE 2 The allowable grades of spheroidal graphite cast iron are listed in Tables 3 and 4. Service conditions are given in Clause 4.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

EN 764-2:2002, *Pressure equipment — Part 2: Quantities, symbols and units.*

EN 764-5:2002, *Pressure equipment — Part 5: Compliance and inspection documentation of materials.*

EN 837-1:1996, *Pressure gauges — Part 1: Bourdon tube pressure gauges — Dimensions, metrology, requirements and testing.*

EN 837-3:1996, *Pressure gauges — Part 3: Diaphragm and capsule pressure gauges — Dimensions, metrology, requirements and testing.*

EN 1369:1996, *Founding — Magnetic particle inspection.*

EN 1370:1996, *Founding — Surface roughness inspection by visual tactile comparators.*

EN 1371-1:1997, *Founding — Liquid penetrant inspection — Part 1: Sand, gravity die and low pressure die castings.*

EN 1559-1:1997, *Founding — Technical conditions of delivery — Part 1: General.*

EN 1559-3:1997, *Founding — Technical conditions of delivery — Part 3: Additional requirements for iron castings.*

EN 1563:1997, EN 1563:1997/A1:2002, EN 1563:1997/A2:2005, *Founding — Spheroidal graphite cast irons.*

EN 12680-3:2003, *Founding — Ultrasonic examination — Part 3: Spheroidal graphite cast iron castings.*

EN 12681:2003, *Founding — Radiographic examination.*

EN 13445-1:2009, *Unfired pressure vessels — Part 1: General.*

EN 13445-3:2009, *Unfired pressure vessels — Part 3: Design.*

EN 13445-5:2009, *Unfired pressure vessels — Part 5: Inspection and testing.*

EN 13835:2002, EN 13835/A1:2006, *Founding — Austenitic cast irons.*

EN ISO 945:1994, *Cast iron — Designation of microstructure of graphite (ISO 945:1975).*

EN ISO 8062-1:2007, *Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts — Part 1: Vocabulary (ISO 8062-1:2007).*

EN ISO 8062-3:2007, *Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts — Part 3: General dimensional and geometrical tolerances and machining allowances for castings (ISO 8062-3:2007).*

3 Terms, definitions, units and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this European Standard, the following terms and definitions apply.

3.1.1
critical zone
highly stressed area where a fracture is expected to occur in a burst test or where surface fatigue cracks are expected to be initiated due to fluctuating pressure loads

NOTE 1 Critical zones may occur, for example, by any of the following:

— sudden change in cross section;

— sharp edges;

— sharp radii;

— peak stresses;

— bending stresses;

— stresses due to other than membrane stress;

— changes in curvature.

NOTE 2 A critical zone is analysed by any appropriate method, e.g. holographic, interferometric, strain gauge methods, burst test, fatigue testing, FEM analysis etc.

NOTE 3 Additionally, thermal gradients and thermal stresses due to different operating wall temperatures need to be considered in defining critical zones.

3.1.2
purchaser
individual or organisation that buys pressure equipment, including assemblies or parts, for its own use or on behalf of the user and/or operator

3.1.3
manufacturer
individual or organisation responsible for the design, fabrication, testing, inspection, installation of pressure equipment and assemblies where relevant

NOTE 1 The manufacturer may subcontract one or more of the above mentioned tasks under its responsibility.

NOTE 2 In EU member states the manufacturer is responsible for compliance with the Pressure Equipment Directive 97/23/EC. For those manufacturers outside of the EU their authorized representative inside the EU assumes this responsibility.

3.1.4
casting manufacturer
subcontractor that produces the castings used in the manufacture of pressure equipment

3.1.5
testing factor
A reduction factor applied to the nominal design stress to take account of possible manufacturing deficiencies

3.1.6
temperature factor
A reduction factor applied to the 0,2 % proof strength to take account of temperature influence

3.1.7
wall thickness factor
a reduction factor applied to the nominal design stress to take account of reduced mechanical properties

3.1.8
ferritic spheroidal graphite cast iron
cast material, iron and carbon based (carbon being present mainly in the form of spheroidal graphite particles) with a predominantly ferritic matrix

3.1.9
austenitic spheroidal graphite cast iron
cast material with an austenitic matrix which is iron and carbon based and alloyed with nickel and manganese, copper and/or chromium in order to stabilize the austenitic structure at room temperature

3.2 Units

For the purposes of this European Standard, the units given in EN 764-2:2002 apply.

3.3 Symbols

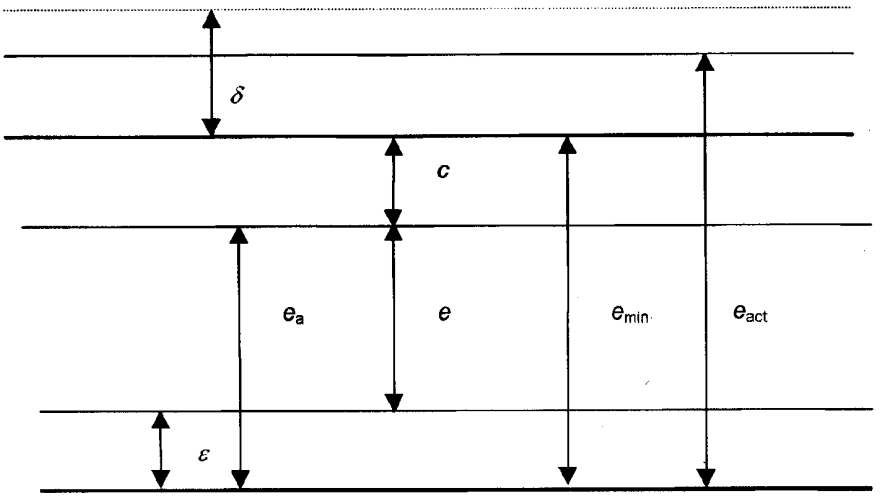
Symbols used in this European Standard are listed in Table 3.3-1.

Table 3.3-1 — Symbols

Symbol	Quantity	Unit
c	Corrosion allowance	mm
e	Required thickness	mm
e_a	Analysis thickness	mm
e_{act}	Actual thickness	mm
e_{min}	Minimum thickness as specified on drawing	mm
E	Modulus of elasticity	MPa
f	Nominal design stress	MPa
F	Fatigue factor related to 99,8 % survival	_
$P_{b,act}$	Actual burst test pressure	MPa[a]
P_b	Minimum required bursting pressure	MPa [a]
P_d	Design pressure	MPa [a]
PS, P_S	Maximum allowable pressure	MPa [a]
PT, P_t	Test pressure	MPa [a]
RM	Material strength parameter	MPa
$R_{p0,2}$	0,2 %-proof strength	MPa
R_m	Tensile strength	MPa
$R_{m(3)}$	Average tensile strength of 3 test bars taken from the same lot or heat	MPa
TS_{min}, TS_{max}	Minimum / maximum allowable temperature	°C
T	Calculation temperature	°C
V	Volume	L
C_e	Wall thickness factor	_
C_T	Temperature factor	_
C_Q	Testing factor	_
n	Factor depending on shape of shell	_
f_e	Thickness correction factor	_
f_m	Mean stress correction factor	_
f_s	Surface finish correction factor	_
S	Safety factor	_
γ_R	Partial safety factor	_
δ	Casting tolerance	mm
ε	Extra thickness due to casting process	mm
ν	Poisson's ratio	_

[a] MPa for calculation purpose only, otherwise the unit be bar (1 MPa = 10 bar)

3.4 Inter-relation of thicknesses definitions



Key

e is the required thickness

e_a is the analysis thickness

e_{min} is the minimum thickness including corrosion allowance as indicated on drawings

e_{act} is the actual thickness

c is the corrosion allowance

ε is the extra thickness due to casting process

δ is the casting tolerance

Figure 3.4-1 — Inter-relation of thicknesses definitions

4 Service conditions

4.1 Cyclic loading

Spheroidal graphite cast iron pressure vessels and vessel parts can be used for cyclic operation if the stress factor is limited to 3. If the calculated number of cycles is close to a limit number of cycles mentioned in Table 4.1-1 below to determine the need for fatigue analysis, a worst-case model shall be implemented for this determination.

If it is expected that under service conditions the maximum number of full pressure cycles will exceed the limit number according to Table 4.1-1, or exceeds more than the equivalent number of cycles with smaller amplitude, then a fatigue analysis shall be performed according to Annex D.

Table 4.1-1 — Number of full pressure cycles for cyclic loading consideration

Testing factor	Maximum number of full pressure cycles without mandatory fatigue analysis according to Annex D	
C_Q = 0,9	1 000	
C_Q = 0,8	40 000	if 2,5 < stress factor ≤ 3
	200 000	If stress factor ≤ 2,5

NOTE 1 A testing factor of 0,9 implies the application of higher nominal design stresses and consequently results in a lower maximum number of full pressure cycles without mandatory fatigue analysis.

NOTE 2 A stress factor (ratio of peak stress to fatigue stress) of more than 3, determined by any of the design methods given in 5.2 can be the result of inappropriate design. By enlarging radii or other small changes, an acceptable design may be generated.

For pressure cycles at a pressure difference ΔP_i less than the full pressure, the number of equivalent full cycles is given by Equation (4.1-1):

$$n_{eq} = \sum_{i=1}^{i=N} n_i \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}} \right)^{8,6} \qquad (4.1\text{-}1)$$

where

N is the total number of envisaged types of pressure cycles with different amplitude;

n_i is the number of cycles of amplitude ΔP;

ΔP_i is the pressure cycle amplitude;

P_{max} is the maximum permissible pressure, as defined in 3.15 of EN 13445-3:2009.

4.2 Limitations on temperature and energy content

The minimum and maximum allowable temperatures TS_{min} and TS_{max} shall be in accordance with the limits given in Tables 5.1-1 and 5.1-2.

The product $PS \cdot V$ for a single casting shall not exceed 100 000 bar·L.

5 Requirements

5.1 Materials

All cast iron grades subject to internal or external pressure shall comply with EN 1563 for ferritic spheroidal graphite cast iron and EN 13835 for austenitic spheroidal graphite cast iron.

The ferritic material grades given in Table 5.1-1 shall be used for applications where the minimum allowable temperature is higher or equal to – 10 °C.

The material grades listed in Table 5.1-2 are intended for low temperature or high temperature design conditions.

Table 5.1-1 — Allowable material grades for usual design temperatures (-10 °C up to 300 °C)

Material standard	Material designation [b]		Design temperature limits °C
	Symbol	Number	
EN 1563	EN-GJS-350-22	EN-JS1010	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-350-22 U [a]	EN-JS1032	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-350-22U-RT [a]	EN-JS1029	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-400-18	EN-JS1020	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-400-18U [a]	EN-JS1062	$-10 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-400-18U-RT [a]	EN-JS1059	$-10 \leq TS \leq 300$

[a] Mechanical properties verified on test pieces from cast-on samples. These grades should be chosen in preference to the material grades with the separately cast samples when the unit mass of the casting is equal to or greater than 2 000 kg or when the relevant wall thickness varies between 30 mm and 200 mm.

The material grades listed in Table 5.1-1 and Table 5.1-2 may be produced in the as-cast or heat treated condition (see EN 1563:1997, Clause 6).

[b] When materials specified in these tables are not available, other suitable materials may be used when the technical documentation defining the characteristics of the materials has been accepted in accordance with the requirements for European approval for materials (EAM) or particular material appraisal (PMA).

Table 5.1-2 — Allowable material grades for low or high temperature design conditions

Material standard	Material designation [b]		Design temperature limits °C
	Symbol	Number	
EN 1563	EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	$-40 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-350-22U-LT [a]	EN-JS1019	$-40 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	$-20 \leq TS \leq 300$
	EN-GJS-400-18U-LT [a]	EN-JS1049	$-20 \leq TS \leq 300$
EN 13835	EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	$-196 \leq TS \leq 300$
	EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	$-40 \leq TS \leq 540$
	EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	$-40 \leq TS \leq 300$

[a] Mechanical properties verified on test pieces from cast-on samples. These grades should be chosen in preference to the material grades with the separately cast samples when the unit mass of the casting is equal to or greater than 2 000 kg or when the relevant wall thickness varies between 30 mm and 200 mm.

The material grades listed in Table 5.1-1 and Table 5.1-2 may be produced in the as-cast or heat treated condition (see EN 1563:1997, Clause 6 and EN 13835:2002, Clause 6).

[b] When materials specified in these tables are not available, other suitable materials may be used when the technical documentation defining the characteristics of the materials has been accepted in accordance with the requirements for European approval for materials (EAM) or particular material appraisal (PMA).

Material grades EN-GJS-350-22-LT or EN-GJS-350-22U-LT can be used at design temperatures down to – 60 °C. When used between (-40 ± 2) °C and (-60 ± 2) °C, impact testing at the minimum design temperature shall be:

— mean value from 3 tests 12 J for $e_{act} \leq 60$ mm;

— 10 J for 60 mm ≤ $e_{act} \leq 200$ mm;

— individual value 9 J for $e_{act} \leq 60$ mm and 7 J for 60 mm ≤ $e_{act} \leq 200$ mm.

The applicable requirements for the delivery conditions given in EN 1559-1:1997 and EN 1559-3:1997 shall also apply.

NOTE The use of materials working in the creep domain is not applicable to this standard since stress ranges are limited to elastic behaviour.

5.2 Design

5.2.1 Technical documentation

The manufacturer shall document those items listed in Clause 5 of EN 13445-5:2009 prior to fabrication.

5.2.2 Design methods

5.2.2.1.1 Principle

The loadings to be accounted for shall be in accordance with EN 13445-3:2009, Clause 5.

The service conditions of Clause 4 shall be accounted for.

Design methods shall be in accordance with this European Standard and, when applicable, with the relevant clauses of EN 13445-3:2009.

If the geometry of the component or the loading case do not allow calculation by the formulas given in EN 13445-3:2009 and Annex G, design by analysis (DBA) (see Annex E) or design by experiment (DBE) shall be applied.

Depending on the complexity of the component, the loading conditions and the level of NDT testing, the designer may choose one of the following available design methods mentioned below. Guidance is given on the correlation between safety factor, testing factor and the method to assess dynamic loading (see Table 5.2-1).

5.2.2.1.2 Static loading

In order to design the part for static loading, the following options can be considered by the designer.

5.2.2.1.3 Design by formula (DBF)

Equations for the calculation of the various components of the pressure part are given in EN 13445-3:2009 and Annex G. Annex G gives additional equations for non-standard shaped parts often used in casting design.

5.2.2.1.4 Design by analysis (DBA)

The following applies:

1) decide whether the direct route (limit load – EN 13445-3:2009, Annex B) or the stress categorisation method (EN 13445-3:2009, Annex C) will be followed. Decide whether linear or non-linear approach will be used;

2) base modelling and interpretation of calculation results shall be based on analysis thicknesses (e_a) and material characteristics at operation temperature;

3) for interpretation of calculation results, follow the evaluation procedures and assessment criteria in order to evaluate the fitness for purpose of the real structure. These design checks and related procedures are typical for the failure mode to be dealt with. For the different failure modes see EN 13445-3:2009.

5.2.2.1.5 Design by experiment (DBE)

Where design by equations according to EN 13445-3:2009 is not considered appropriate due to complex shape of the component, then a hydraulic burst test to determine the analysis thickness ea and the minimum thickness e_{min} shall be performed according to the procedure in 5.2.2.1.6. This test is also a part of the technical documentation.

This design method may be used without additional calculations if $P_d \cdot V < 6000$ bar·L.

If $P_d \cdot V > 6000$ bar·L for the complete vessel, this method can be used in addition to DBA or DBF.

The minimum required thickness at a specific location is given by:

$$e_a = e_{act} \cdot \left(\frac{S \cdot PS \cdot R_{m(3)}}{P_{b,act} \cdot R_{p0,2} \cdot C_Q \cdot C_T \cdot C_e} \right)^{1/n} \quad (5\text{-}1)$$

$$e_{min} \geq e_a + c \quad (5\text{-}2)$$

where

$e_{act.}$ is the minimum measured wall thickness at the specific location;

$R_{p0,2}$ is in accordance with Annex A;

$P_{b,act}$ is the actual obtained value of burst pressure or the highest pressure during the test;

$n = 1$ for curved surfaces (cylinders, spheres) or cones with angles $\alpha \leq 60°$, stayed surfaces and stressed parts if bending stress is less than 2/3 of the total stress;

$n = 2$ for all other surfaces.

5.2.2.1.6 Determination of the hydraulic burst pressure and maximum allowable pressure for static loading

A random sample from the production of the vessel or vessel part shall be taken for the burst test or to determine the maximum allowable working conditions. The procedure shall be as follows:

1) verify that the part or vessel to be tested is cast according to the specified drawing and any revision thereof. The material used shall be the same type and grade as for the production part;

2) verify that the part or vessel is machined to the same dimensions as the production part;

3) verify that the material properties meet the requirements of 5.1. For each casting used for the burst test, 3 test pieces for tensile testing, and, if applicable, for impact testing, shall be separately cast and tested. The results and the calculated average tensile strength shall be certified in accordance with 6.5;

4) the wall thicknesses of the entire casting shall be measured (at least one measurement per 100 mm x 100 mm). The results shall be marked on the casting at the location of the measurement or on the drawing;

5) verify that a calibrated pressure gauge is used; maximum tolerance shall conform to at least class 1 or better according to EN 837-1 and EN 837-3. The scale of the pressure gauge shall be approximately 4/3 of the anticipated burst pressure;

6) the pressure shall be increased in a controlled manner until the minimum required burst pressure is obtained:

$$P_b \geq PS \cdot \frac{R_{m(3)}}{f}\left(\frac{e_{act}}{e_{min} - c}\right)^n \qquad (5\text{-}3)$$

The pressure shall be increased further in a controlled manner until rupture occurs. Record burst pressure $P_{b,act}$, test date, material specification, details of material, part number, and wall thickness e_{act} measured at burst location. A relation with the actual burst pressure $P_{b,act}$, which can be higher than P_b on account of a better stress distribution, and the maximum allowable pressure PS, can be deducted according the converted Equation 5-3, replacing P_b by $P_{b,act}$

$$PS \leq P_{b,act} \cdot \frac{f}{R_{m(3)}}\left(\frac{e_{min} - c}{e_{act}}\right)^n \qquad (5\text{-}4)$$

7) if a part fails to meet any of those requirements, a second identical production part may undergo the same test procedure. If this second part meets the test requirements, this part may be accepted after investigation of the cause of failure of the first part. If the second part does not meet the test requirements, the design of the part shall be deemed not to conform to the specification;

8) during the burst test, it is acceptable for leaks and lack of pressure tightness to occur between flanged, gasketted or bolted parts as long as the pressure P_b can be reached during the test. It is acceptable for gasket(s) to break during the burst test; their characteristics may be modified without unduly changing flange load properties as long as their design meets the design rules of EN 13445-3:2009 for the anticipated maximum allowable pressure P_s;

9) only for the test, bolts of higher mechanical strength than required by the design specification may be accepted;

10) when flanged connections are designed according to the requirements of EN 13445-3:2009 with respect to minimum required thickness, minimum required bolt area and shape, it is acceptable, in order to reach burst test pressure, to install extra bolts in addition to the number specified for production;

11) the rupture under test pressure or any hydraulic test shall not be performed by means of a construction on a hydraulic press that can counteract the free shell bending under pressure.

5.2.2.1.7 Dynamic loading

If the number of full pressure cycles or equivalent full pressure cycles according to Equation (4.1-1) exceeds the number of full pressure cycles for static loading considered in Table 4.1-1, a fatigue assessment of the complete design is required. In order to design the part for dynamic loading, the following options can be considered by the designer.

5.2.2.1.8 Simplified fatigue assessment (SFA)

A simplified fatigue assessment will return a value of maximum allowable number of equivalent pressure fluctuations under service conditions. The assessment shall be performed according to Annex D. A maximum stress factor of 3 is pre-supposed, unless for construction details as limited in Table D.1A where equal or lower values than 3 may be used.

NOTE This Table D.1A may also be used for other metallic castings than spheroidal graphite cast iron (e.g. cast steel, cast aluminium and so on).

5.2.2.1.9 Detailed fatigue assessment (DFA)

A detailed fatigue assessment returns a value of maximum allowable number of equivalent pressure fluctuations using detailed stress analysis in service conditions. The assessment shall be performed according to Annex D.

5.2.2.1.10 Experimental fatigue assessment (EFA)

This method, as described in Annex H, shall be used if a theoretical stress analysis is inadequate or for which the design analysis shows abnormal low fatigue life values indicating a too conservative approach by theory.

An evaluation of a part by experimental fatigue design is not required when a similar part underwent already such a fatigue assessment and the data are available and transposable into the new design.

Cyclic loading shall be in accordance with EN 13445-3:2009, subclause 5.3.

This method does not take into account excessive wall thickness of the material, linings and all material, which does not contribute to strength.

NOTE For vessels for which $P_d \cdot V \geq 6000$ bar·L this experimental method may be used in addition to detailed fatigue design.

Table 5.2-1 — Determination of safety factor, testing factor and design method

<table>
<tr><th>Non destructive testing</th><th>Safety factor S</th><th>Testing factor C_Q</th><th>Design method
Static loading</th><th>Design assessment
dynamic loading</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Not required</td><td rowspan="3">3,0</td><td rowspan="3">0,8</td><td rowspan="6">DBF
DBA
DBE</td><td>SFA</td></tr>
<tr><td>DFA</td></tr>
<tr><td>EFA</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Required</td><td rowspan="3">2,0</td><td rowspan="3">0,9</td><td>(SFA) [a]</td></tr>
<tr><td>DFA</td></tr>
<tr><td>EFA</td></tr>
<tr><td colspan="5">NOTE: DBF = design by formula
DBA = design by analysis
DBE = design by experiment
SFA = simplified fatigue analysis
DFA = detailed fatigue analysis
EFA = experimental fatigue analysis</td></tr>
<tr><td colspan="5">[a] not recommended</td></tr>
</table>

5.2.2.2 Design conditions

The design stress for ferritic and for austenitic grades shall be calculated as follows:

$$f = \frac{R_{p0,2} \cdot C_T \cdot C_Q \cdot C_e}{S} \qquad (5.2\text{-}1)$$

where

0,2 % proof strength at calculation temperature:

$$R_{p0,2/T} = C_T \cdot R_{p0,2} \qquad (5.2\text{-}2)$$

The temperature reduction factor C_T is:

for ferritic grades

$C_T = 1$ for $T \leq 20$ °C (5.2-3)

$C_T = 1 - 0{,}001\ (T - 20)$ for 20 °C < $T \leq$ 200 °C (5.2-4)

$C_T = 0{,}82$ for 200 °C < $T \leq$ 300 °C (5.2-5)

and for austenitic grades

$C_T = 1$ for $T \leq 20$ °C (5.2-6)

$C_T = 1 - 0{,}000\ 5\ (T - 20)$ for 20 °C < $T \leq$ 540 °C (5.2-7)

Wall thickness reduction factor:

$C_e = 1$ for $e_{min} \leq 60$ mm (5.2-8)

C_e = 0,8 for 60 < e_{min} ≤ 200 mm (5.2-9)

5.2.2.3 Testing conditions

The test pressure may exceed the value given in equation 7.2-1 either intentionally or occasionally. However, the nominal design stress for testing conditions, f_{test} shall not exceed the 0,2 % proof strength $R_{p0,2/T_{test}}$ corrected with the factor C_e at test temperature divided by the safety factor 1,33.

$$f_{test} = \frac{R_{p0,2/T_{test}} \cdot C_e}{1,33} \quad (5.2\text{-}10)$$

5.2.2.4 Reinforcement of openings in cylinders, flat ends, dished ends, cones, etc.

Reinforcement of openings in cylinders, flat ends, dished ends, cones, etc. shall be determined in accordance with EN 13445-3:2009. When reinforcement is calculated with the area replacing method, the reinforcing length along the vessel wall considered shall be ≤ $2e_{min}$ to calculate the additional reinforcing area.

5.2.2.5 Design for external pressure

Design for external pressure shall be carried out according to EN 13445-3:2009, clause 8, where:

$$f = R_{p0,2/T} \cdot C_Q \cdot C_e \quad (5.2\text{-}11)$$

and

$$S = 3,5 \quad (5.2\text{-}12)$$

5.2.2.6 Fillet radius

The largest possible fillet radius shall be used for walls under internal or external pressure in accordance with good foundry practice (fabrication tolerances are to be taken into account). Good foundry practice makes it sometimes necessary to increase wall thickness and to choose a corresponding fillet radius. Parts cast according to this European Standard therefore exhibit enhanced fatigue properties. It is important to verify that local stresses never exceed the maximum permissible values, especially at changes in section thickness or at change in radii.

If it is not possible, for any reason, to avoid sudden changes in cross-section area, and the pressure bearing wall is subject to cyclic loading, a taper of maximum ratio 1:3 from the thin wall to the thick wall shall be included.

All radii applied to a vessel part, including external cast lugs, support feet, etc. shall be greater than or equal to 1,5 times the thickness of the thinnest adjacent wall.

If, for any reason, a smaller radius is applied (as cast or after machining), the design verification shall be made by DBA.

5.3 Founding

5.3.1 General

The castings shall be free from surface and internal defects that might impair their usability. No excessive residual stress shall be permitted to be built up in the casting that can impair the fracture behaviour or the fatigue life of the casting. This can be achieved by allowing the casting sufficiently long cooling periods in the mould followed by cooling in still air. The casting manufacturer shall document this cooling procedure (required cooling time) in a process or work instruction. If this procedure to avoid excessive residual stresses cannot be complied with, a stress relieving heat treatment shall be carried out, based on agreement between the parties concerned.

5.3.2 Welding

No production, repair or cosmetic welding shall be carried out on cast iron parts both in ferritic or austenitic grades, which are manufactured according to this European Standard.

6 Material testing

6.1 General

All material tests as required by EN 1563 or EN 13835 shall be performed.

6.2 Frequency and number of tests

For each batch the amount of testing shall be, on each ladle treated for spheroidization or each heat treatment batch:

— chemical analysis;

— one tensile test;

— one hardness test;

— impact testing, when required by material specification (consisting of 3 test pieces).

If the spheroidizing treatment is carried out in the mould, the same amount of testing for each 2 500 kg cast weight of identical parts produced during the same day shall be carried out.

For series production of RT grades according to Table 5.1-1, the amount of impact testing can be reduced to one test per day on the ladle with the highest silicon content.

The separately cast or cast–on test pieces shall be chosen according to EN 1563 or EN 13835. The test sample size shall represent the wall thickness of the part (see EN 1563 or EN 13835 for size determination).

NOTE Cast-on test pieces are representative of the castings to which they are attached and their size depends on the relevant wall thickness of the casting.

6.3 Chemical analysis

The methods used to determine the chemical composition of the material shall be in accordance with recognised standards.

For ferritic spheroidal graphite cast iron the following elements shall be analysed: C, Si, Mn, P, S and Mg.

For austenitic spheroidal graphite cast iron the following elements shall be analysed: C, Si, Mn, P, S, Mg, Cu and Ni.

6.4 Graphite structure

Graphite morphology of the material shall comply with form VI and V in accordance with EN ISO 945. The verification of nodularity shall preferably be carried out either by microscopic examination or by an ultrasonic method. Visual or computerised and/or automated methods are allowed.

When the ultrasonic method is used, the ultrasonic velocity shall be a minimum of 5 460 m/s using a calibrated measuring device. If the velocity is less than 5 460 m/s, the nodularity may still be verified and approved using the microscopic method on the worst test specimen. If the spheroidization is found acceptable, the material is approved. When ultrasonic examination is used, the verification shall be carried out on the last cast metal of each ladle.

6.5 Inspection documents

Inspection documents shall be in accordance with EN 764-5:2002, 4.3.3.

7 Testing and final assessment

7.1 Testing

7.1.1 General

All material tests of cast vessels and vessel parts, manufactured according to this part, shall be in accordance with Table 7.1-1 and Table 7.1-2.

Table 7.1-1 — Summary of testing requirements

	Testing factor C_Q	Magnetic particle inspection	Ultra sonic testing/ radiographic testing	Sectioning	Visual inspection	Wall thickness measure-ment
Initial sample	0,8	-	+	+	+	+
	0,9	+	+	+	+	+
0-serie: pre-production	0,8	-	+ (10 %)	-	+	+
	0,9	+	+	+ (1 part)	+	+
Serial production	0,8	-	-	-	+	+
	0,9	+	-	-	+	+
NOTE + = required, - = not required						

7.1.2 Testing requirements for C_Q = 0,8

Testing shall be carried out in accordance with the requirements and adopting the acceptance criteria given in Table 7.1-2 for surface imperfections only.

7.1.3 Testing requirements for C_Q = 0,9

— At non critical zones: testing same as for C_Q = 0,8 as given in 7.1.2;

— at critical zones: all castings shall be subjected to a magnetic particle inspection of all critical zones as indicated on the drawing, without revealing any unacceptable imperfection.

The last casting representing a batch of castings made from the same ladle or during the same day shall be subjected to a radiographic examination or equivalent (see footnote [b] in Table 7.1-2) of a zone indicated on the drawing, without revealing any unacceptable imperfections.

Table 7.1-2 — Testing according testing factor

	Testing factor		
	C_Q = 0,8	C_Q = 0,9	
Location	Complete part	Non critical zone	Critical zone
Surface imperfections			
Requirement	See 7.1.4 Cracks, laps, cold shot and non-fused chaplets are not permitted. See 7.1.5		
Testing method	Visual (both for C_Q = 0,8 and C_Q = 0,9)		
Testing frequency	100%		
Imperfections close to the surface			
Requirement	No requirement	No requirement	See 7.1.7
Testing method	Not applicable.	Not applicable.	Magnetic particle testing for ferritic grades. Dye penetrant testing for austenitic grades.
Testing frequency	Not applicable.	Not applicable.	100 %
Internal imperfections (micro and macro porosity)			
Requirement	See 7.1.6 (EN 12680-3, severity level 3)	See 7.1.6 (EN 12680-3, severity level 3)	See 7.1.9
Testing method	Ultrasonic testing/ sectioning	Ultrasonic testing/ sectioning	Radiographic testing [b]
Testing frequency	Initial samples Random sampling production series [a]	Initial samples Random sampling production series [a]	Initial samples Last casting of each batch
[a] According to agreement between the parties concerned.			
[b] Ultrasonic testing of castings may substitute radiographic testing following an agreement between the parties concerned.			

7.1.4 Surface imperfections

Sand inclusions, slag inclusions and blowholes shall be limited as follows.

For C_Q = 0,8 and C_Q =0,9 - non critical zone:

A maximum of five imperfections in a square 100 mm x 100 mm facing inwards or outwards shall be accepted. None of these shall cover an area larger than 100 mm² and the total area of the imperfections shall not exceed 200 mm².

The maximum permissible depth of an imperfection is such that the minimum wall thickness is maintained. Grinding of such surface imperfections is permitted down to the minimum wall thickness indicated on the drawing.

C_Q = 0,9 - critical zone:

No imperfections are permitted within the critical zone. Grinding of surface imperfections is permitted down to the minimum dimensions as indicated on the drawing, provided no stress concentration occurs.

7.1.5 Cracks, laps, cold shut and non-fused chaplets

No visible cracks, laps, cold shuts or non-fused chaplets are permitted.

In case of doubt about the severity of the imperfection, liquid penetrant inspection according to EN 1371-1:1997 can be necessary.

7.1.6 Ultrasonic testing and/or sectioning

The ultrasonic testing shall be carried out in accordance with EN 12680-3:2003.

If ultrasonic testing is not feasible, sectioning shall be carried out to visually detect internal imperfections.

Imperfections shall not be permitted on the main pressure bearing part (casting section with minimum required wall thickness specified on the drawing). However, micro shrinkage (centreline porosity) is permitted provided that all mechanical properties in the material standard are fulfilled.

NOTE Micro shrinkage is defined as a cavity smaller than 0,5 mm.

On other parts of the casting imperfections which are centrally located and not covering an area of 300 mm² shall be permitted, provided the minimum distance of the imperfection from the surface is a minimum of 1/3 of the wall thickness or at least 3 mm. Imperfections are not permitted around drilled holes, or where holes are to be drilled, within an area with a diameter of two times the diameter of the hole and concentric with the hole. Only micro shrinkage on the centreline is accepted provided that the required mechanical characteristics of the material standard are fulfilled.

7.1.7 Magnetic particle testing (only for ferritic grades)

The testing shall be carried out in accordance with EN 1369:1996. The maximum severity level shall be equal to or better than SM 3 in Table 2 of EN 1369:1996 and LM4/AM4 in Table 4 of EN 1369:1996.

7.1.8 Penetrant testing

The testing shall be carried out in accordance with EN 1371-1:1997. The maximum severity level shall be equal to or better than SP 02/CP 02 in Table 2 of EN 1371-1:1997 and LP 2/AP 2 in Table 3 of EN 1371-1:1997.

7.1.9 Radiographic testing

The testing shall be carried out in accordance with EN 12681:2003 on a film size at least 100 mm x 240 mm.

The following is not permitted at any size:

— mottling, inserts, cracks, hot tears;

— porosity > Type A Grade 5;

— sand inclusions > Type B Grade 5;

— shrinkage > Type C Grade 5.

7.1.10 Surface roughness

Casting roughness or surface finish shall be approved by the purchaser on a sample casting. Production castings shall have a surface roughness comparable to the approved sample.

The casting surface roughness shall, when required, be tested and specified according to EN 1370:1996 using visual tactile comparators, or as specified by the manufacturer.

7.1.11 Minimum wall thickness

Castings shall be measured on specified locations in order to verify that the required minimum wall thickness has been reached.

Results shall be recorded in an appendix to the material certificate.

The measurement shall be made by ultrasonic or any mechanical measuring devices with an accuracy in accordance with indicated design tolerances.

7.1.12 Wall thickness tolerances

The casting manufacturer shall determine on a regular basis the wall thickness tolerance.

The wall thickness tolerance shall be given in accordance with ISO 8062-3:2003.

The casting tolerance grade to be applied depends on the casting process. The casting manufacturer shall prove its capability to meet the agreed tolerances.

7.1.13 Other dimensions

A full dimensional examination shall be made on the initial samples.

During series production, relevant dimensions shall be inspected on a regular basis to guarantee conformity to the drawing.

7.1.14 Qualification of testing personnel

The personnel carrying out testing shall be qualified as indicated in EN 13445-5:2009.

7.2 Final assessment

7.2.1 General

Final assessment shall be carried out according to EN 13445-5:2009, Clause 10, except for the standard hydraulic test pressure.

7.2.2 Hydraulic test pressure

All pressure bearing spheroidal graphite cast iron parts shall be hydraulically tested with a test pressure, greater or equal to:

$$P_t = \frac{1{,}43 \cdot P_d}{C_T \cdot C_O} \qquad (7.2\text{-}1)$$

When the assembly consists of spheroidal graphite cast iron parts designed with different testing factors, the highest test pressure shall be applied. It shall be checked that at the hydraulic test pressure no part exceeds the allowable stress specified for that part, as defined in 5.2.2.3.

8 Pressure vessels constructed of a combination of parts in different materials

When spheroidal graphite cast iron parts are linked by non-permanent joining with other metallic parts fabricated by welding, forging etc. to form a pressure vessel, the components made according to different fabrication techniques shall satisfy design, inspection and test requirements of the relevant clauses of EN 13445-5:2009.

The assembled vessel shall satisfy the requirements for hydraulic testing at the pressure which is the highest test pressure of the individual components of the assembly. It shall be checked that at the hydraulic test pressure no component exceeds the allowable stress specified for that component.

9 Marking and documentation

9.1 Marking of castings

Pressure vessel castings and cast vessel parts, irrespective of the testing factor, shall be marked at least with the following information, preferably in cast characters with a minimum height of 6 mm:

— casting manufacturer logo or identification;

— type or designation;

— material grade according to EN 1563:1997 or EN 13835:2002.

— cast date, mould or batch number;

— testing factor if $C_Q = 0,9$;

Cast characters, either standing proud, raised or embedded shall not cause any adverse effect on the strength, static and dynamic stability or local stress concentration of the pressure vessel or vessel parts. The cast marking described above may be replaced by a coded system agreed between the parties concerned, and may also be hard stamped. Full traceability of the part to material and test certificates shall be guaranteed.

9.2 Name plate for the complete pressure vessel

The marking of the vessel shall be made according to EN 13445-5:2009, clause 11.

9.3 Documentation

The written declaration of compliance with the standard, records and other relevant documents shall be in accordance with EN 13445-5:2009.

Annex A
(normative)

Technical data for the design calculations

A.1 Purpose

This annex gives for the allowable standard material grades of ferritic and austenitic spheroidal graphite cast iron for pressure vessels and vessel parts the corresponding relevant technical data, which shall be used for design calculations. The material designation and corresponding requirements are in conformity with EN 1563 or EN 13835

If other materials according to 5.1, last sentence, are used, then the technical data used for calculation shall be taken from the applicable European Approval for Materials (EAM) or Particular Material Appraisal (PMA).

A.2 Technical data

A.2.1 Ferritic spheroidal graphite cast iron according to EN 1563:1997

Table A.2.1-1 — Technical data of ferritic spheroidal graphite cast iron

Material designation		0,2% proof strength	Modulus of elasticity	Poisson's ratio	Density
		$R_{p0,2}$	E	ν	
Symbol	Number	MPa	10^3 MPa		kg/dm^3
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	220	169	0,275	7,1
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014				
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015				
EN-GJS-350-22U	EN-JS1032				
EN-GJS-350-22U-RT	EN-JS1029				
EN-GJS-350-22U-LT	EN-JS1019				
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	250			
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024				
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	240			
EN-GJS-400-18U	EN-JS1062	250			
EN-GJS-400-18U-RT	EN-JS1059				
EN-GJS-400-18U-LT	EN-JS1049	240			

Table A.2.1-2 — Effect of design temperature on modulus of elasticity of ferritic spheroidal graphite cast iron

Design temperature (°C)	20	100	150	200	250	300
Modulus of elasticity E (10^3 MPa)	169	167	165	163	161	159
Poisson's ratio ν	0,275 0	0,278 0	0,279 5	0,281 0	0,282 5	0,284 0

A.2.2 Austenitic spheroidal graphite cast iron according to EN 13835:2002

Table A.2.2-1 — Technical data of austenitic spheroidal graphite cast iron

Material designation		0,2% proof strength $R_{p0,2}$	Modulus of elasticity E	Poisson's ratio ν	Density
Symbol	**Number**	**MPa**	**10^3 MPa**		**kg/dm^3**
EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	210	130	0,17	7,45
EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	170	100	0,17	7,40
EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	210	145	0,17	7,30

Table A.2.2-2 — Effect of design temperature on modulus of elasticity of austenitic spheroidal graphite cast iron

Design temperature (°C)	Modulus of elasticity E (10^3 MPa)		
	EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-GJSA-XNi22	EN-GJSA-XNiMn13-7
20	130	100	145
100	128	98	143
150	127	97	141
200	125	96	140
250	124	95	138
300	123	94	137
350	NA	93	NA
400	NA	92	NA
450	NA	91	NA
500	NA	90	NA
540	NA	89	NA

Annex B
(informative)

Ductility

The use of a ductile material such as ferritic or austenitic spheroidal graphite cast iron for applications involving tensile loads requires load-related evaluation of the strength and toughness characteristics in relationship to the operating temperature and the rate of loading with the aim of ensuring safety against brittle fracture under all operating conditions.

Among others, the evaluation criteria for a design are based on the strength calculation and the establishment of the nominal stress. Not only dynamically loaded components should be ensured that brittle fracture does not lead to failure. Under conditions that promote brittle fracture it is possible that a fracture can be initiated at a component stress lower than the yield strength and then lead to fracture through unstable crack propagation. It is only with a sufficient and known fracture toughness or ductility that a material can guarantee the "Leak before fracture" requirement of a component.

The notched bar impact test of spheroidal graphite cast iron is the usual method to determine safety against brittle fracture. Impact energy or notch toughness or notched bar impact energy respectively are mostly used as a measure for determining the toughness or lack of brittleness. Because it is not possible to separate the individual mechanisms of the energy, such as plastic deformation, crack initiation and crack propagation, one uses the instrumented notched bar impact test or the various methods of fracture mechanics. The latter are especially suitable for larger components.

With the fracture mechanics concept, crack size and component stress are quantitatively linked together with a material characteristic, which then is a measure to resistance to crack propagation. The objective is to determine the critical crack size, or the stress that leads to an unstable crack path and to sudden failure of the component.

Linear-elastic fracture mechanics enable quantitative acquisition of the failure of crack-affected components as a result of an unstable crack propagation with static loading or a stable crack propagation with cyclical loading. This determined fracture toughness KIC establishes the material resistance to unstable crack propagation leading to brittle fracture. With ductile materials this concept is only applicable at low temperatures or the presence of embrittlement effects, e.g. through microstructure or large wall thickness.

General yielding fracture mechanics are used if elongated plastic deformation occurs ahead of the crack tip i.e. an elasto-plastic material behaviour. Determination can firstly be by means of the CTOD concept (Crack Tip Opening Displacement), in which the damage mechanism is controlled by the critical deformation at the crack tip.

With the J-integral concept a line integral is defined around the crack tip. Analogous with the previous concept one obtains a material characteristic that defines resistance to the initiation of cracks.

In view of the foregoing comments it is understandable that, on its own, determination of the notch impact energy in a ferritic spheroidal graphite cast iron in no way represents a suitable measure for comparing its toughness or ductility with that of steel. This is because it is not possible to make any statement regarding the plastic deformability and cracking behaviour of the material.

Contrary to this, the ferritic spheroidal graphite cast irons which have a notched bar impact energy of 12 J to 20 J, have a crack initiation behaviour that corresponds with an unalloyed to a low alloy steel with a far higher notch impact energy of around 50 J in the high position. The fracture toughness values of ferritic spheroidal graphite cast iron results in elasto-plastic fracture behaviour even down to –60 °C, i.e. a tough fracture characteristic, so that the KIC values are on the same level as with an unalloyed and low alloyed steel.

Annex C
(informative)

Determination of the minimum local wall thickness and minimum required burst test pressure

Equations used:

$$e_a = e_{act} \cdot \left(\frac{S \cdot PS \cdot R_{m(3)}}{P_{b,act} \cdot R_{p0,2} \cdot C_Q \cdot C_T \cdot C_e} \right)^{1/n} \quad \text{(C.1)}$$

$$e_{min} \geq e_a + c \quad \text{(C.2)}$$

$$\frac{R_{p0,2/20}}{R_{p0,2/T}} = \frac{1}{C_T} \quad \text{(C.3)}$$

$$C_T = 1 - 0{,}001\,(T - 20) \quad \text{(C.4)}$$

for ferritic grades

$$PS \leq P_{b,act} \cdot \frac{f}{R_{m(3)}} \cdot \left(\frac{e_{min} - c}{e_{act}} \right)^n \quad \text{(C.5)}$$

Table C-1 — Data

Design data	Calculated data	Measured data
PS = 8 bar (0,8 MPa) max. working pressure	P_d =1,30 MPa Design pressure	$P_{b,act}$ = 13 MPa (130 bar) actual burst pressure
e_{min} = 7 mm minimum thickness on drawing	e_a = 3,69 mm analysis thickness	e_{act} = 8 mm actual measured thickness at ruptured wall
c = 1 mm	f =60 MPa, nominal design stress	
T = 120 °C	C_T = 0,9 temperature factor	
S = 3		
C_Q = 0,8		
n = 1 (curved area)		
Annex A design data		**Measured material data**
$R_{p0,2}$ = 250 MPa		$R_{p0,2}$ = 280 MPa actual proof strength
for EN-GJS-400-18		$R_{m(3)}$ = 450 MPa average of actual tensile strength on 3 test samples

Conclusion

P_d design pressure = 1,3 MPa > PS : Satisfactory.

e_{act} = 8,0 mm > e_{min} = 7,0 mm > e_a + c = 3,69 + 1 = 4,69 mm; the wall thickness satisfies the maximum operating conditions (PS = 8 bar or 0,8 MPa).

Annex D
(normative)

Assessment of fatigue life

D.1 Purpose

D.1.1 This annex specifies requirements for the simplified and/or detailed assessment of fatigue life of pressure equipment due to pressure fluctuations, additional stress by temperature changes in operating conditions or additional induced stresses due to external forces in the critical zones (for critical zone see definition 3.1.1). Pressure equipment from spheroidal graphite cast irons shall be designed and manufactured according to this European Standard, and the material grades according to Tables 5.1-1 and 5.1-2 shall be used.

D.1.2 The rules for the simplified assessment may be applied in case of internal pressure fluctuations only. The detailed assessment concerns pressure fluctuations and possible other cyclic loads, such as additional stress by rapid temperature changes in operation conditions or additional induced stresses due to external forces in the critical zones (for critical zone definition see 3.1.1).

NOTE The rules for the simplified assessment are based on conservative assumptions. More accurate, less conservative results can be obtained with the rules for the detailed assessment.

D.1.3 It is assumed that the vessel has been designed according to all requirements of EN 13445-6. This annex only applies if the service conditions for static load consideration (see Clause 4, Table 4.1-1) are not fulfilled.

D.1.4 Fatigue cracks can propagate from surface imperfections located on the side opposite to pressure loading. Acceptance criteria for these imperfections are given in 7.1. Evidence for possible failure under cyclic loading gives the occurrence of a surface fatigue crack, which can be detected by applying an appropriate non-destructive test method and which nature can be assessed by optical examination.

D.2 Specific definitions

See EN 13445-3:2009 and clause 3.

D.3 Specific symbols and abbreviations

The following symbols and abbreviations are in addition to those given in 3.3 and in EN 13445-3:2009, clause 4, 17.3 and 18.3.

C_C factor in equation of fatigue design curve for spheroidal graphite cast iron components;

m_C exponent in equation of fatigue design curve for spheroidal graphite cast iron components.

e_{max} maximum local thickness (mm) of component at the location of a possible fatigue crack initiation

D.4 Limitations

D.4.1 These rules apply to components designed by:

a) Formulae;

b) Finite Element Analysis

D.4.2 These rules apply only to components operating outside the creep range (i.e. when the nominal design stress is time-independent).

D.4.3 The data on which these rules are based are valid for fatigue in non corrosive environment. It is assumed that in the case of corrosive conditions precautions are taken i.e. corrosion allowance and / or surface protection.

D.5 General

D.5.1 ΔP shall be obtained by applying either the simplified cycle counting method described in EN 13445-3:2009, 18.9.2 or the reservoir cycle counting method in EN 13445-3:2009, 18.9.3.

D.5.2 The calculations according to D.6 or D.7 shall be performed for the various components of the vessel. The stress determination in castings is based on a stress analysis of notched parts. The lowest life obtained from each component is the fatigue life of the vessel.

D.5.3 Any notch radius should be at least 1,5 times the adjacent minimum wall thickness in order to reduce the local stress factor. To avoid abrupt section thickness transitions a taper ratio of 1:3 should be introduced as pointed out in 5.2.2.6.

D.6 Simplified fatigue assessment

D.6.1 Pseudo-elastic stress range

The simplified assessment is based on the determination of a corrected pseudo-elastic stress range $\Delta\sigma^*$ in conjunction with fatigue design curves as defined in D.6.3.

$$\Delta\sigma^* = \frac{\Delta P \cdot \eta \cdot f}{P_{max} \cdot f_e \cdot f_{T^*}} \qquad \text{(D.6.1)}$$

For simplification the maximum allowable pressure of the component (P_{max}) may be set equal, either to the maximum allowable pressure *PS* of the whole vessel, or to the calculation pressure *P*.

NOTE 1 These simplifications lead to more conservative results.

NOTE 2 Since f and P_{max} in Equation (D.6.1) are taken at the calculation temperature, no consideration need to be given to at which temperatures cycles occur.

NOTE 3 P_{max} can be calculated in accordance with EN 13445-3:2009. When a calculation is not possible with a design by formulae for the main pressure bearing parts, an experimental value according to this European Standard can be taken.

For each component the value of the stress factor η is obtained from Table D.1A of this Part.

For details which are not described in Table D.1A, a value for η of 3 shall be used, except if a lower value can be justified by e.g. 3-D finite element stress analysis, experimental analysis, etc.

NOTE 4 It is no longer required to use Table 17-1 from EN 13445-3:2009 substituting the weld joint factor z=1.

The correction factors f_e and f_{T^*} shall be determined as indicated in D.6.2.

A correction factor for surface finish and mean stress level is not required since this factor is already taken into account in the fatigue design curves of D.6.3. The actual surface conditions should meet the requirements of 7.1.

D.6.2 Correction factors

D.6.2.1 Correction for wall thickness

$$f_e = \left(\frac{25}{e_{max}} \right)^{0,182} \quad \text{(D.6.2)}$$

$f_e = 1$ for $e_{max} \leq 25$ mm (D.6.3)

For $e_{max} > 150$ mm, the value of f_e for $e_{max} = 150$ mm applies.

D.6.2.2 Correction for temperature

The temperature correction factor f_{T^*} is given by:

— for ferritic materials:

$$f_T = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^* - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{*2} \quad \text{(D.6.4)}$$

— for austenitic materials:

$$f_T = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot T^* \quad \text{(D.6.5)}$$

where the mean cycle temperature is:

$$T^* = 0,75 \cdot T_{max} + 0,25 \cdot T_{min} \quad \text{(D.6.6)}$$

$f_{T^*} = 1$ for temperatures $T^* < 100$ °C,. (D.6.7)

D.6.3 Fatigue design curves

The fatigue design curves given in Figure D.1 are described by the following equation:

$$\Delta\sigma_R = \frac{C_Q}{0,9} \cdot \frac{C_C}{N^{1/m_c}} \quad \text{(D.6.8)}$$

where

C_C and m_C are constants whose values are given in Table D.1.

For constant amplitude loading, the endurance limit $\Delta\sigma_D$ (i.e. stress range below which the fatigue life can be assumed to be infinite) corresponds to the stress range $\Delta\sigma_R$ at 2×10^6 cycles.

The dotted lines in Figure D.1 apply only to cumulative damage calculations (Equation D.8.1) under variable amplitude loading which includes stress ranges larger than $\Delta\sigma_D$. The curves end at $N = 10^8$ cycles. The corresponding stress range is the cut-off limit $\Delta\sigma_{Cut}$. For appropriate values of $\Delta\sigma_{Cut}$ see Table D.1. The fictitious stress ranges below this limit $\Delta\sigma_{Cut}$ are assumed to be non-damaging in fatigue for the pressure equipment.

Table D.1 — Coefficients of the fatigue design curves for spheroidal graphite cast iron grades- simplified assessment

Material	Constants of curve $\Delta\sigma_R - N$ (a)				Allowable stress range at N cycles MPa			
	$10^3 < N < 2 \times 10^6$		$2 \times 10^6 < N < 10^8$		$C_Q = 0,9$		$C_Q = 0,8$	
	$1/m_C$	C_C	$1/m_C$	C_C	$\Delta\sigma_D$ at 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ at 10^8	$\Delta\sigma_D$ at 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ at 10^8
EN-GJS-400-18	0,116	786	0,1	623	146	99	130	88
EN-GJS-350-22	0,116	731	0,1	579	136	92	121	81
EN-GJSA-XNiMn23-4	0,116	714	0,1	566	133	89	118	79
EN-GJSA-XNi22	0,116	642	0,1	507	119	80	106	71
EN-GJSA-XNiMn13-7	0,116	714	0,1	566	133	89	118	79
(a) For E according to Table A.2.1-1 and Table A.2.2-1.								

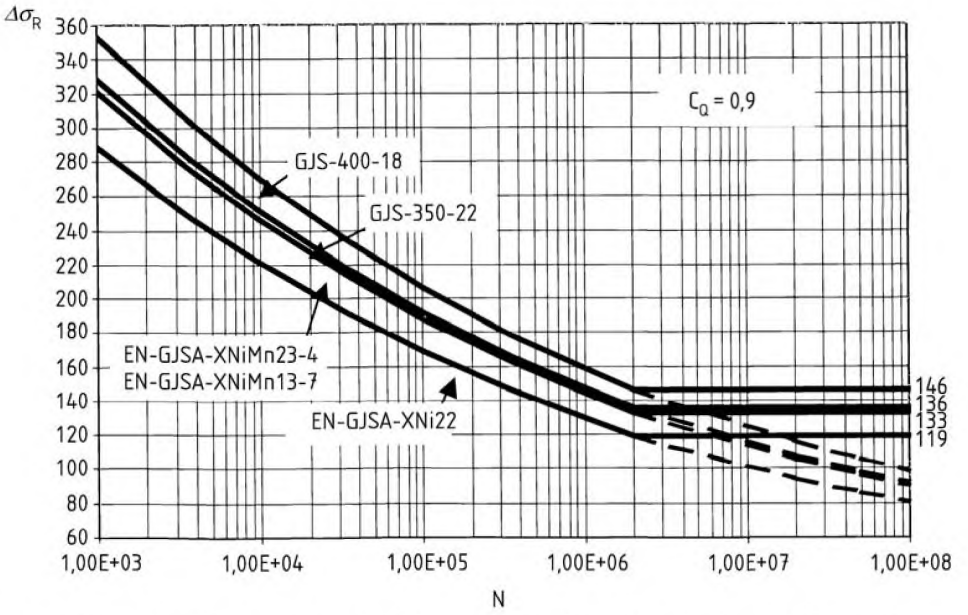


Figure D.1 — Fatigue design curves for ferritic and austenitic spheroidal graphite cast iron grades at ambient temperature - Simplified assessment

NOTE 1 These fatigue design curves have been derived from those given in D.7 for detailed assessment (Figure D.2). They incorporate the notch effect of all local stress concentrations whose K_T factor does not exceed approximately 2 Instead of 2, also the more accurate value of 1, 88 may be used This value is the ratio of the endurance limit of the design curves in figure D.2 over that in figure D.1.For the definition of the theoretical stress factor K_T, see D.7.1, equation D.7.3). They are valid for the same probability of survival, i.e. Ps > 97, 7%.

The value of η is obtained from Table D.1A for each vessel detail. It is an upper bound of the following ratio:

$$\eta = \frac{\text{maximum structural stress in the detail at } P_{max}}{\text{nominal design stress at calculating temperature}}$$

To assess the fatigue life of a detail not covered by Table D.1A, the η value shall be obtained through an estimate of the maximum structural stress in the detail under pressure P_{max}.

For simplification, the maximum value η for the whole vessel can be assumed to apply for any detail.

NOTE 2 These values apply equally for any cast part made from metallic material (cast steel, cast aluminium, etc..) since it is independent from the material.

Table D.1A — Stress factor η and associated maximum pressure for typical cast constructions

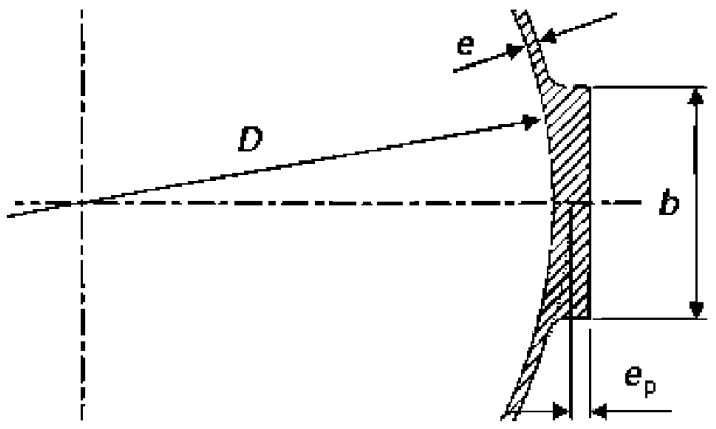
Detail description	Detail	Maximum permissible pressure P_{max}	Conditions	Stress factor η
Cylindrical or conical shells	Left intentionally blank	Cylindrical shell: EN 13445-3:2009, equation (7.4.3) Conical Shell: EN 13445-3:2009, equation (7.6.4)		1,0
Pad for data plate on cylindrical or conical shell		As for shell details	$b \le 0{,}4 \cdot D$ $e_p \le 2 \cdot e$	1,1

Table D.1A *(continued)*

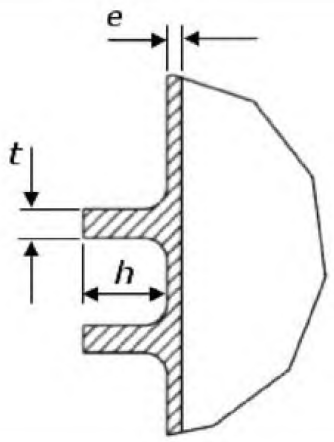
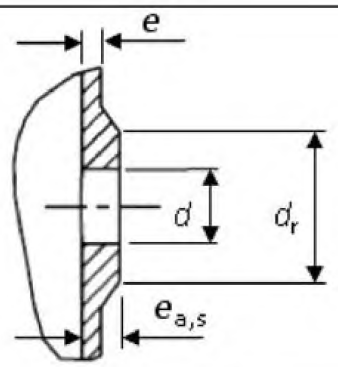
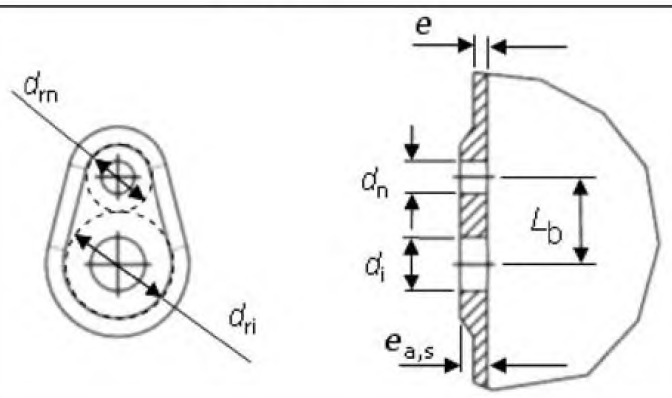
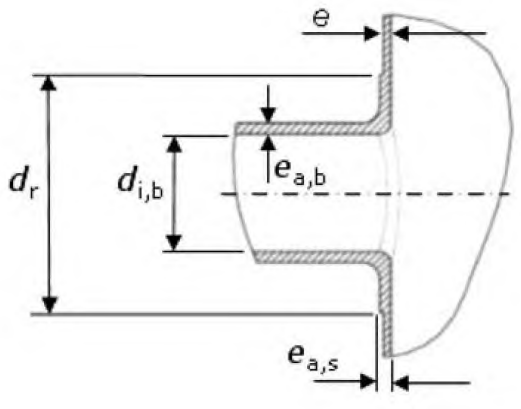
Detail description	Detail	Maximum permissible pressure P_{max}	Conditions	Stress factor η
Stiffening ring (single or multiple) on cylindrical or conical shell		As for shell details	$2 \cdot e \le t \le 4 \cdot e$ $2 \cdot e \le h \le 6 \cdot e$	1,0
Single opening with reinforcement in shell or spherical end		As for shell details	$e_{a,s} \ge 2 \cdot e$ $d_r \ge 2 \cdot d$	3,0
Multiple openings with reinforcement in shell or spherical end		As for shell details	$e_{a,s} \ge 2 \cdot e$ $d_{r,i} \ge 2 \cdot d_r$ $d_{r,n} \ge 2 \cdot d_r$ $L_b \ge d_i + d_n$	3,0
Nozzle with reinforcement in shell or spherical end		As for shell details	$e_{a,s} \ge 1{,}5 \cdot e$ $e_{a,b} \ge 1{,}5 \cdot e$ $d_r \ge 2 \cdot d_{i,b}$ $d_{i,b} / D_i^e < 0{,}6$	2,0
Nozzle without reinforcement in shell or spherical end			$e_{a,s} = e$ $e_{a,b} = e$ $d_{i,b} / D_i^e < 0{,}6$	3,0

Table D.1A *(continued)*

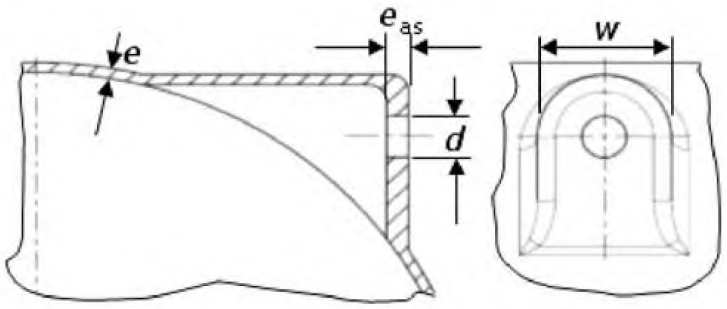
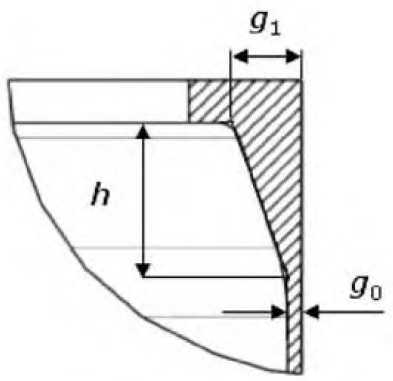
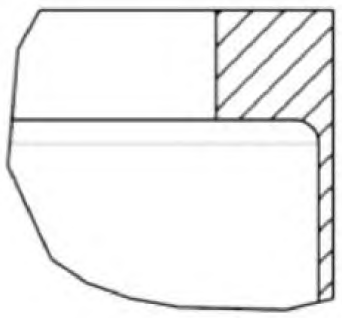
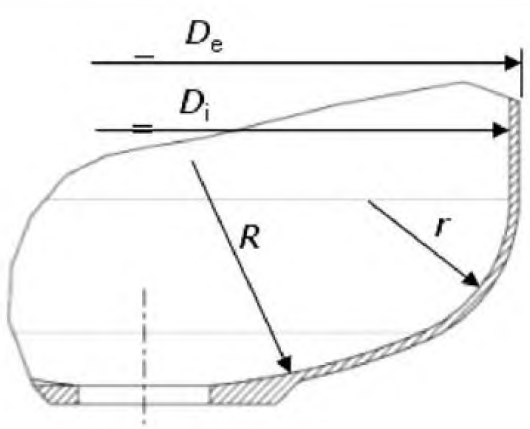
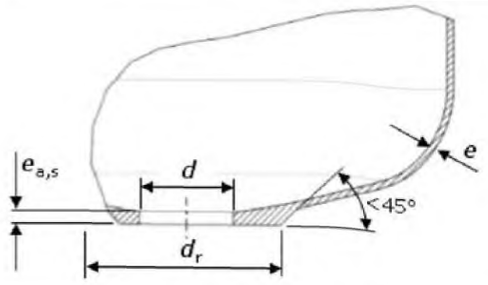
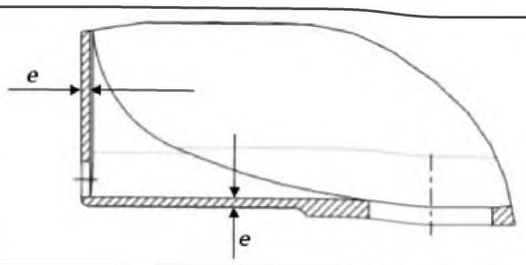
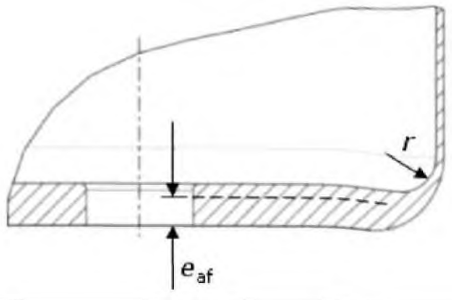
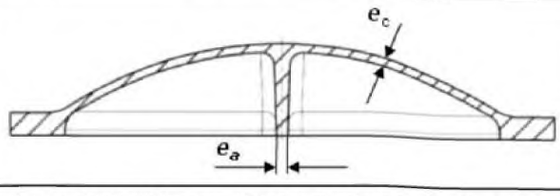
Detail description	Detail	Maximum permissible pressure P_{max}	Conditions	Stress factor η
Tangential inlet/outlet in cylindrical or conical shell		As for shell details	$e_{a,s} \geq 2 \cdot e$ $3 \cdot d \leq w \leq 5 \cdot d$	2,5
Flange with hub		See EN 13445-3:2009, Clause 11 or Annex G[a]	$g_1 \geq 4 \cdot g_0$ $h \geq 3 \cdot (g_1 - g_0)$	1,5
			$4 \cdot g_0 \geq g_1 \geq 2 \cdot g_0$ $h \geq (g_1 - g_0)$	2,0
Flange without hub		See EN 13445-3:2009, Clause 11 or Annex G[a]	$g_1 = g_0$ $h = 0$	2,0
Torispherical end knuckle region		See EN 13445-3:2009, equation (7.5-7) [b]	$R / D_e \leq 0,8$ $r / D_i \geq 0,15$	2,0
			Other parameters according EN 13445-3:2009 Clause 7.5.3.1	2,50

Table D.1A *(continued)*

Detail description	Detail	Maximum permissible pressure P_{max}	Conditions	Stress factor η
Reinforced opening in torispherical end		As for torispherical end detail	$e_{a,s} \geq 2 \cdot e$ $d_r \geq 2 \cdot d$	2,0
Opening for drain in torispherical end		As for torispherical end detail		3,0
Flat end knuckle region		See EN 13445-3:2009 Clause 10 [c]	$r \geq 1{,}3 \cdot e_{af}$ [d]	1,5
			$1{,}3 \cdot e_{af} > r \geq e_{af}$	3,0
Opening in flat end			See EN 13445-3:2009, Clause 10.6.1	2,0
Separation rib in dished cover		As for cover detail, see Annex G	$e_a \geq e_c$	1,1

NOTE e_{af} is the analysis thickness of flat end calculated without opening (see EN 13445 -3:2009 Clause 10.4.3)

[a] The maximum calculation pressure is not given explicitly in EN 13445-3:2009 Clause 11. It shall be calculated as the pressure which gives stresses to their allowable limits, or in EN 13445-3:2009 Annex G a load ratio equal to 1,0. As a conservative simplification P_{max} may be taken as P_{design}.

[b] For use within the present clause P_{max} is taken as equal to P_y given by equation 7.5-7 in EN 13445-3:2009. The other possible determinations P_s and P_b (given by equations 7.5-6 and 7.5-8 respectively) are not relevant here.

[c] The maximum calculation pressure is that of the flat end (not that of the adjacent cylindrical shell). In formula D.6-1, the value f to be introduced is the lowest of that for the end and that for the shell.

[d] Since no explicit formula is given for P_{max} in EN 13445-3:2009 Clause 10 P_{max} shall be calculated as the pressure which gives the required end thickness equal to the analysis thickness. As a conservative simplification P_{max} may be taken as P_{design}.

[e] D_i is the vessel internal diameter

D.6.4 Allowable number of cycles

In order to obtain the allowable number of load cycles *N*, at a specified stress range $\Delta\sigma^*$, the following shall be calculated:

$$N = \left(\frac{C_Q}{0,9} \cdot \frac{C_C}{\Delta\sigma^*} \right)^m \quad \text{(D.6.9)}$$

The value for $\Delta\sigma^*$ shall be calculated using Equation (D.6.1)

D.6.5 Allowable stress range $\Delta\sigma$

Alternatively, to obtain the allowable stress range $\Delta\sigma$ for a specified number of applied load cycles *N*:

$$\Delta\sigma \le \Delta\sigma_R \cdot f_e \cdot f_T \quad \text{(D.6.10)}$$

where

$$\Delta\sigma_R = \frac{C_Q}{0,9} \cdot \frac{C_C}{N^{1/m_c}} \quad \text{(D.6.11)}$$

f_e and f_T shall be calculated according to D.6.2.

D.7 Detailed fatigue assessment

D.7.1 Pseudo-elastic stress ranges

According to the method described in EN 13445-3:2009, Clause 18 for un-welded components the values of the maximum equivalent stress range $\Delta\sigma_{eq}$ and the structural stress range $\Delta\sigma_{eq,struc}$ are determined using a detailed numerical calculation method. From these values the corrected equivalent effective notch stress range $\Delta\sigma^*$ can be obtained by use of K_{eff}:

$$\Delta\sigma^* = K_{eff} \cdot \frac{\Delta\sigma_{eq,struc}}{f_s \cdot f_e \cdot f_T \cdot f_m} \quad \text{(D.7.1)}$$

where

$$K_{eff} = 1 + \frac{1,5 \cdot (K_T - 1)}{1 + 0,5 \cdot MAX\left\{1; K_T \cdot \frac{\Delta\sigma_{eq,struc}}{\Delta\sigma_D}\right\}} \le K_T \quad \text{(D.7.2)}$$

$$K_T = \frac{\Delta\sigma_{eq}}{\Delta\sigma_{eq,struc}} \quad \text{(D.7.3)}$$

where

$\Delta\sigma_D$ is the endurance limit for $N \ge 2 \times 10^6$ cycles from Table D.2.

It is conservative to assume $K_{eff} = K_T$. The correction factors f_s, f_e, f_{T^*} and f_m shall be determined as indicated in D.7.2.

D.7.2 Corrections to stress range

D.7.2.1 Correction for wall thickness

$$f_e = F_e^{(0,1 \ln N - 0,465)} \quad \text{(D.7.4)}$$

where

$$F_e = \left(\frac{25}{e_{max}} \right)^{0,182} \quad \text{(D.7.5)}$$

where

f_e = 1 for $e_{max} \leq 25$ mm.

For $e_{max} > 150$ mm, the value of f_e for $e_{max} = 150$ mm applies

D.7.2.2 Correction for temperature

The temperature correction factor f_{T^*} is given in D.6.2.2.

D.7.2.3 Surface finish correction factor

In order to keep local stresses low, a finer surface finish due to appropriate moulding techniques is advantageous on the side opposite to the fluctuating pressure.

$$f_s = F_s^{(0,1 \ln N - 0,465)} \quad \text{(D.7.6)}$$

where

$$F_s = 1 - 0,03 \cdot \ln(R_z) \cdot \ln\left(\frac{R_m}{200} \right) \quad \text{(D.7.7)}$$

$f_s = F_s$ if $N > 2 \cdot 10^6$

where

R_Z is the peak-to-valley height in µm. (Set R_Z = 200 if not specified.)

D.7.2.4 Correction for mean stress

The mean stress correction factor f_m is to be determined from EN 13445-3:2009, 18.11.1.3. However the mean stress sensitivity factor M for spheroidal graphite cast iron grades according this European Standard is:

$$M = 0,00035 \cdot R_m + 0,08 \quad \text{(D.7.8)}$$

D.7.2.5 Plasticity correction factors

Correction factors for mechanical k_e and thermal k_v loadings in the hyper plastic range can be ignored, as a result of the high safety factors on 0,2 % proof strength used for the calculation of the nominal design stress in EN 13445-6:2009 together with structural stresses never exceeding 3*f*.

D.7.3 Fatigue design curves

The fatigue design curves given in Figure D.2 are described by the following equation:

$$\Delta\sigma_R = \frac{C_Q}{0,9} \cdot \frac{C_C}{N^{1/m}} \qquad \text{(D.7.9)}$$

where

C_C and m_C are constants whose values are given in Table D.2.

Table D.2 — Coefficients of the fatigue design curves for spheroidal graphite cast iron grades - detailed assessment

Material	Constants of curve $\Delta\sigma_R - N$ ([a])				Allowable stress range at *N* cycles MPa			
	$10^3 < N < 2 \times 10^6$		$2 \times 10^6 < N < 10^8$		$C_Q = 0,9$		$C_Q = 0,8$	
	$1/m_C$	C_C	$1/m_C$	C_C	$\Delta\sigma_D$ at 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ at 10^8	$\Delta\sigma_D$ at 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ at 10^8
EN-GJS-400-18	0,10	1 173	0,10	1 173	275	186	244	165
EN-GJS-350-22	0,10	1 091	0,10	1 091	256	173	227	154
EN-GJSA-XNiMn23-4	0,10	1 065	0,10	1 065	249	168	222	150
EN-GJSA-XNi22	0,10	957	0,10	957	224	151	199	135
EN_GJSA-XNiMn13-7	0,10	1 065	0,10	1 065	249	168	222	150
([a]) For *E* according Table A.1 and Table A.3.								

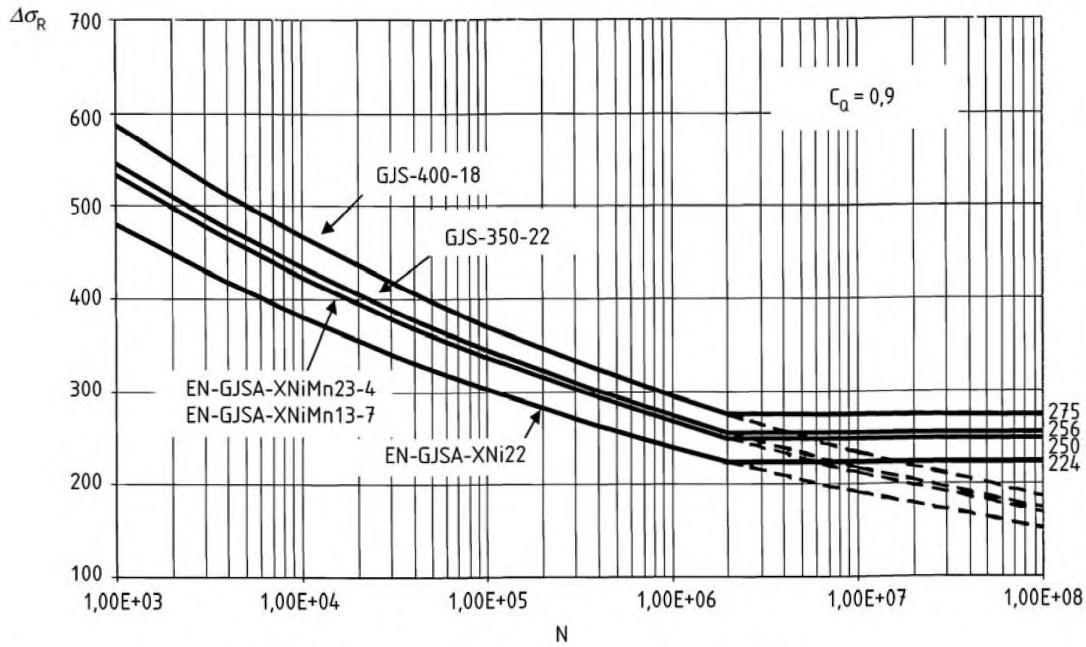


Figure D.2 — Fatigue design curves for ferritic and austenitic spheroidal graphite cast iron grades at ambient temperature - Detailed assessment

NOTE The fatigue design curves in Figure D.2 have been derived from data (See ref [1]) obtained from un-notched test pieces of spheroidal graphite cast iron grade EN-GJS-400-18 from axial and bending fatigue tests performed under load control or, for applied strains exceeding yield (low cycle fatigue), under strain control. The allowable stresses have been derived from the mean results by applying safety factors of 5 on fatigue life and 1,3 on stress range. The resulting design curves embody a probability of survival P_s of at least 97, 7%.

The dotted lines in Figure D.2 apply only to cumulative damage calculations (Equation D.8.1) under variable amplitude loading which includes stress ranges larger than $\Delta\sigma_D$. The curves end at $N = 10^8$ cycles. The corresponding stress range is the cut-off limit $\Delta\sigma_{Cut}$. For appropriate values of $\Delta\sigma_{Cut}$ see Table D.2. The stress ranges below this limit $\Delta\sigma_{Cut}$ are assumed to be non-damaging in fatigue for the pressure equipment.

D.7.4 Allowable number of cycles

In order to obtain the allowable number of load cycles N, at a specified stress range $\Delta\sigma^*$, the following shall be calculated:

$$N = \left(\frac{C_Q}{0,9} \cdot \frac{C_C}{\Delta\sigma^*} \right)^m \qquad \text{(D.7.10)}$$

The value for $\Delta\sigma^*$ shall be calculated using Equation (D.7.1).

D.7.5 Allowable stress range

Alternatively, in order to obtain the allowable structural stress range $\Delta\sigma_{eq,struc}$ for a specified number of applied load cycles N:

$$\Delta\sigma_{eq,struc} \leq \Delta\sigma_R \cdot f_e \cdot f_s \cdot f_m \cdot f_{T^*} / K_{eff} \qquad \text{(D.7.11)}$$

where

f_e , f_s , f_m and f_{T^*} shall be calculated according to D.7.2. K_{eff} is calculated from Equation (D.7.2) or conservatively set equal to K_T .

D.8 Assessment rule for total fatigue damage

The total fatigue damage index due to the cumulative effect of cycles of variable amplitude loading, forming a specified design stress range spectrum, is calculated as follows:

$$D = \sum_i^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \ldots \qquad \text{(D.8.1)}$$

Where n_i are the numbers of cycles of each stress range $(\Delta\sigma^*)_i$ applied during the design life of the vessel, and N_i are the allowable number of cycles corresponding to that stress range, obtained in accordance with D.6.4 or D.7.4 from the appropriate fatigue design curve.

The design is acceptable if the following condition is met:

$$D \leq 1 \qquad \text{(D.8.2)}$$

If $D > 1$, the condition is not met and the design shall be modified.

D.9 Repairs of surface imperfections

If an unacceptable surface imperfection occurs which does not meet the requirements of 7.1, an improvement can only be made by grinding. The minimum actual required thickness shall be calculated according to this annex, taken into account all clauses of this European Standard about the design requirements. Welding is not allowed, as has been stated in 5.3-2.

Annex E
(normative)

Design by analysis for castings

E.1 Introduction

For cast iron pressure vessels the general procedures and corresponding rules as covered by:

— Annex B "Design by Analysis – Direct Route" and

— Annex C "Design by Analysis – Method based on stress categories"

of EN 13445-3:2009 shall be modified as follows.

E.2 Special requirements to EN 13445-3:2009, Annex B

E.2.1 Addition to B.8.2.3: Design checks for normal operating load cases

Material strength parameters (*RM*) and partial safety factors (γ_R) shall be as given in following table:

Table E.1 — *RM* and γ_R for normal operating load cases

Material	*RM*	γ_R
Spheroidal graphite cast iron [a]	$R_{p0,2/T}$	$1.67/(C_Q.C_e)$
[a] For allowable material grades see Table 5.1-1 and Table 5.1-2.		

E.2.2 Addition to B.8.2.4: Design checks for testing load cases

RM and γ_R shall be as given in following table:

Table E.2 — *RM* and γ_R for testing load cases

Material	*RM*	γ_R
Spheroidal graphite cast iron [a]	$R_{p0,2/Ttest}$	$1,33/C_e$
[a] For allowable material grades see Table 5.1-1 and Table 5.1-2.		

E.3 Additions to EN13445-3:2009, Annex C

The symbol "*f*" used in C.7. "Assessment criteria" is defined in 5.2.2.2.

E.4 Requirements

Design by analysis calculations shall include the following:

— a detailed description of the numerical method used, including the name and version of computer software, if applicable;

— description of model geometry (including element type for finite element analysis);

— loading conditions and boundary conditions used to address the load cases in the User's Design Specification;

— material characteristics used for all required physical properties (i.e. modulus of elasticity, Poisson's ratio, thermal expansion coefficient, thermal conductivity, thermal diffusivity), strength parameters (i.e. yield and tensile strength), and the design membrane stress intensity;

— description of whether material nonlinearity is utilized in the analysis including a description of the material model (i.e. stress-strain curve and cyclic stress-strain curve);

— description of the numerical analysis procedure (i.e. static analysis, buckling analysis, natural frequency analysis, dynamic analysis) and whether geometrically linear or non-linear option is invoked;

— Graphical display of relevant results (i.e. numerical model, deformed plots, and contour plots of thermal and stress results);

— method used to validate the numerical model (i.e. mesh sensitivity review and equilibrium check for finite element analysis, e.g. check of hoop stress in a component away from structural discontinuity and a check to ensure that global equilibrium is achieved between applied loads and reactions at specified boundary conditions);

— description of processing the numerical analysis results in order to obtain final results (i.e. stress linearization method, use of centroidal or nodal values for stress, strain, and temperature results);

— a summary of the numerical analysis results showing the acceptance criteria utilized to meet the requirements of this European Standard;

— electronic storage of analysis results including input files and output files that contain numerical analysis results utilized to demonstrate code compliance.

Annex F
(informative)

Recommandations for in-service validation and inspection

F.1 Purpose

This annex gives recommendations for the continued acceptance of cast equipment made according to this European Standard.

The instructions for use issued by the manufacturer may contain requirements for in-service inspections and may contain recommendations for re-inspections depending on the design, service and required service life.

F.2 Tests during operation

Every pressure vessel or pressure vessel part should be externally and, if necessary, internally inspected (by non-destructive methods) at a period not later than the calculated allowable fatigue lifetime according to Annex D. If the lifetime due to normal service conditions is considered to be infinite by the manufacturer an inspection shall be made after 10 years of service when no adverse situation has been signalled from the operator or the inspector to the manufacturer.

NOTE 1 This time corresponds to the allowable number of cycles when the design stress range spectrum includes only one type of cycle. For more complex loading spectra, it corresponds to the time when a total fatigue damage index of 0,5 (see definition in Annex D) has been reached.

The operator should record the number of load cycles in use in a suitable way and, if necessary, arrange for internal or external inspections.

NOTE 2 The records can indicate a need for a sooner inspection interval than originally laid down. If no records exist, the inspector may choose the least favourable occurring condition during operation of the vessel or vessel part.

NOTE 3 Longer inspection intervals may possibly result from calculations according to Annex D with a detailed assessment of fatigue life than from the simplified fatigue assessment method.

NOTE 4 A damage to be expected can also be found in non-pressure bearing parts such as intersections between supporting lugs and vessel wall which might induce fatigue crack initiation and consequently reduce the life of the pressure part.

If no record exists the number of load cycles may be estimated in normal operating conditions and agreed upon between the user and the inspector.

For pressure vessels subject to cyclic loading, in-service inspections are of particular importance to detect incipient damage in good time. Therefore, the internal inspections should be supplemented by non-destructive tests on highly stressed locations, especially by test methods suitable to detect surface cracks.

For monitoring inaccessible areas, ultrasonic testing from the outside surface of the vessel is recommended.

If the operating conditions deviate greatly from those assumed in the calculation according to Annex D in terms of a greater cyclic loading, or if damage of the vessel wall is to be expected before the end of the inspection intervals owing to other operating influences, the inspection intervals should be shortened.

Conversely, if no incipient cracks are detected during the regular inspections, the vessel can be operated further up to the next inspection in the interval laid down or agreed, even if the allowable lifetime as calculated according to Annex D has already been reached or has been exceeded.

F.3 Measures to be taken when the calculated allowable fatigue lifetime has been reached

F.3.1 General

If the allowable fatigue lifetime for a vessel or component, determined by calculation according to Annex D or by experiment according to Annex H, shows an infinite lifetime by calculation or experimentation, no non-destructive tests have to be carried out when the vessel or vessel part has been working at no higher than the design conditions where it was intended for.

If the allowable fatigue lifetime of the component given in the operating instructions has been reached (i.e. if the allowable number of cycles has been reached different from an infinite number of cycles or if the total fatigue damage index according to Annex D has reached the value 1, non-destructive tests should be performed as completely as possible concentrating on highly stressed locations and critical zones.

If no cracks are detected by the non-destructive tests conducted in the inspection intervals and in the test above, continued operation may be allowed.

If cracks or crack-like defects or other more extensive damage are found, the component or the structural element concerned should be replaced, unless continued operation appears admissible after verification by appropriate measures.

F.3.2 Testing of vessels and pressure parts at end of life without indicated damages

When the number of equivalent full pressure cycles has reached the end of life, a pressure test should be performed when deemed necessary for certain service parameters. For the method of testing see next paragraph.

F.3.3 Hydraulic testing of vessels and vessel parts with indicated damages

When the number of equivalent full pressure cycles has reached the end of life, a hydraulic pressure test should be performed. The time held shall be at least sufficient to perform a complete inspection with a minimum time of 10 min irrespective of part size.

If the test is successfully passed, then the operation can be continued.

When indicated damages are visible before the number of equivalent full pressure cycles has been reached, a reconsidering of the design may be necessary, either to choose another material grade, to lower design parameters or to verify if all possible load cases have been considered.

Annex G
(normative)

Specific design requirements

G.1 Scope

This annex will give requirements to the designers in detail designs of cast nodular parts to determine the required thickness by formulae of uncommon shapes, not included in EN 13445-3:2009 but frequently used in cast design.

NOTE This Annex G contains only one example of flange design, but may be extended with other construction details when such is indicated by the manufacturers and no specific DBF rules are given in EN 13445-3:2009. Odd shapes can always be verified by DBA design methods, but are often more expensive.

This design rule is applied to cast dished covers without the knuckle radius, subject to pressure, for which the following conditions are satisfied.

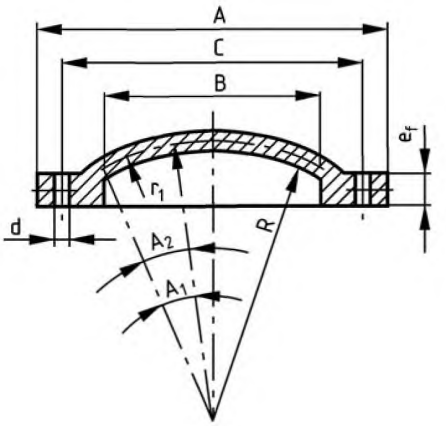


Figure G.1 — Cast dished cover

$A_1 \geq 20°$ and

$A_1 \geq 115 \cdot \sqrt{\frac{e_a}{R}}$ where

$R \leq 1000$ mm.

The spherical part needs to be above the flange horizontal half centreline.

G.2 Design

G.2.1 General

Calculation of nominal design stress according 5.2.

Bolt loads and areas, calculation according 11.4.3 and 11.5.2 of EN 13445-3:2009.

G.2.2 Cover thickness, pressure to convex side

$$e_c = 0{,}85 \cdot \frac{PS \cdot R}{f} \qquad \text{(G.2-1)}$$

G.2.3 Pressure to concave side

If the pressure on the convex side is larger than on the concave side the thickness of the crown shall not be less than

$$e_c = 1{,}65 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{PS \cdot n}{E}} \qquad \text{(G.2-2)}$$

where

n is determined according to the table below. Intermediate values are obtained by linear interpolation.

Table G.1 — Form factor

e_C/R	n
0,001	5,5
0,003	4,0
0,005	3,7
0,01	3,5
0,1	3,0

G.2.4 Flange thickness

For metal to metal contact and O-ring gaskets:

$$e_f = 2{,}3 \cdot \sqrt{\frac{W_{op}}{f} \cdot \frac{C - B}{2\pi \cdot C - \frac{n \cdot d}{2}}} \qquad \text{(G.2-3)}$$

For gaskets inside the bolt circle diameter

$$e_f = 1{,}1 \cdot \sqrt{\frac{W_{op}}{f} \cdot \frac{C - B}{A - B - d}} \qquad \text{(G.2-4)}$$

where

n is the number of bolts;

W_{op} is the operating force determined by EN 13445-3:2009, Clause 11.

Annex H
(normative)

Experimental cyclic pressure testing procedure

H.1 Purpose

This annex gives requirements for the fatigue testing of pressure vessels or pressure vessel parts in cases where a fatigue assessment cannot be adequately performed due to special shape or lack of experience.

All the requirements given form a consistent set which should be applied as a whole. This test is also a part of the technical documentation.

H.2 Validity

The fabrication of pressure vessels or vessel parts presumes that the manufacturer intending the production has acquired the necessary competence and sufficient experience to manufacture according to the specified standard. This means that tests, performed by the manufacturer or a recognised laboratory are only valid for the same manufacturer producing the production parts with the same casting process.

H.3 Tests requirements

H.3.1 General

Test conditions shall be deduced from the maximum operating conditions. When a pressure part is subject to cyclic pressure testing at ambient temperature, and when TS_{max} and TS_{min} differs from the test temperature, test pressure shall be increased by $1/f_T$, according eq. D.6-3 for ferritic grades and D.6.4 for austenitic grades.

H.3.2 Number of parts

Random samples taken from production of the vessel or vessel part shall be used for fatigue test to determine the allowable number of load cycles. This is called the fatigue batch.

H.3.3 Procedure

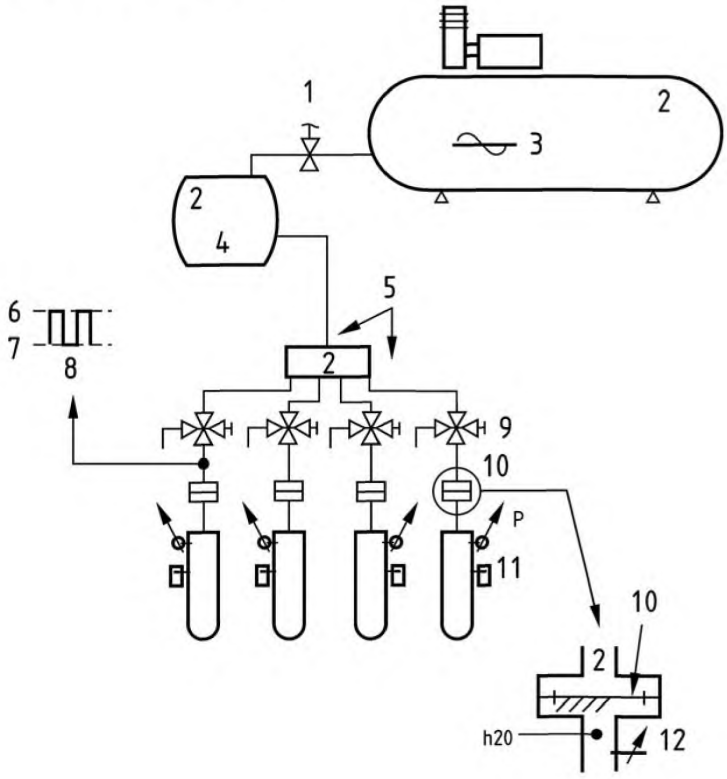
— Verify that the vessels or vessel parts to be tested are in accordance with the appropriate drawing and specification.

— Verify that the vessel or vessel part is machined to the same dimensions and tolerance specifications as the production part.

— Verify that a calibrated pressure gauge is used; maximum tolerance shall conform to at least class 1 or better according to EN 837-1:1996 and EN 837-3:1996.

— The scale of the pressure gauge shall be approximately 4/3 of the anticipated maximum cyclic test pressure.

The following test set–up may be used for a layout.



Key

1	pressure regulation	7	P_{min}
2	air tank	8	pressure pulse frequency
3	variable pressure	9	three way valve
4	constant pressure	10	membrane
5	air circuit as short as possible	11	cycle counter
6	P_{max}	12	water level detector

Figure H.1 — Test set-up

Pressure cycling shall be performed in accordance with the following procedure:

— fill the pressure part to be tested with a non-corrosive fluid such as oil, inhibited water or glycol;

— vent all air pockets.

— The rate of pressurization shall not exceed 14 bar/s. If, for pressure in excess of 80 % of the design burst pressure, the rate of pressurization exceeds 3,5 bar/s, then either the temperature shall be recorded to show no abnormal or excessive heating of the vessel, or there shall be a 5 s hold at the next pressure pulse.

— Ensure that the number of pressure cycles shall not exceed 10 cycles/min.

It is not acceptable that, during the test, leaks and lack of tightness occur between flanged, gasketed or bolted parts.

The test shall not be performed by means of a clamped construction on a hydraulic press which can counteract the shell bending stress resulting in no free movement of the wall under pressure.

The number of cycles to failure shall be reported, along with the location and description of the failure initiation.

H.3.4 Material tests

The following tests and examinations shall be carried out on each vessel submitted for approval tests:

— a hydraulic pressure test according to 7.2.1 shall be carried out prior to the cyclic pressure testing;

— visual examination in the final condition according to 7.1.1;

— magnetic particle inspection (only for ferritic grades). The inspection shall be carried out in accordance with EN 1369:1996;

— after the test a material sample shall be taken from the location where the fatigue crack occurred. The following tests shall be carried out:

a) thickness measurement;

b) microstructure investigation;

c) analysis of the type of fracture.

H.4 Allowable number of cycles

To decrease the test time a higher cyclic pressure than the maximum allowable pressure can be applied. Three or more tests are required. In each test the pressure shall be cycled between the minimum value given by the installation P_{min} and P_{maxexp} where the elasticity limit is expected to be reached for the most stressed vessel component. In most designs, $2 \cdot PS \le P_{max\,exp} \le \min(P_{max}, 3 \cdot PS)$.

If the required fatigue life exceeds 10000 cycles, it is permissible to accelerate the test by applying a higher cyclic pressure range ΔP where $\Delta P = P_{max\,exp} - P_{min}$.

The geometric mean fatigue life (in cycles) obtained shall not be less than

$$N_{c.gm} = \left(\frac{PS}{\Delta P}\right)^{m_c} \cdot N_{req} \cdot F \qquad \text{(H.4-1)}$$

where

$N_{c.gm}$ is the geometric mean fatigue life obtained from the tests;

N_{req} is the required number of full pressure cycles;

PS is the maximum allowable pressure (MPa)

ΔP is the pressure range in fatigue test

m_c is the exponent in the equations describing the fatigue design curves

F is a test factor

NOTE $N_{c,gm}$ should be a lower value compared with N_{req}. If the value is still too high one could used a higher ΔP or a larger amount of samples.

The test factor F depends on the required probability of survival, the number of test results and the standard deviation of $\log N$, σ. For consistency with the design $\Delta\sigma_R - N$ curves for spheroidal graphite cast iron Annex D of this standard, the required probability of survival is 97, 7 %.A selection of values of k, which correspond to 95 % confidence in 97,7 % survivability are given in Table H.1. Values for other numbers of tests may be obtained from ISO 12107.

Table H.1 — Values of *k* with number of test specimen

Number of tests	*k*
3	9,1
4	6,1
5	5,0
6	4,4
7	4,0
8	3,8
9	3,6
10	3,5

F is derived using the one-sided tolerance limit factor, k, such that:

$$F = 10^{k\sigma}$$

The standard deviation of $\log N$ may be obtained from these tests or other representative tests.

NOTE The standard deviation of log N is a measure of the scatter in fatigue lives obtained from a number of fatigue tests.

Values of F for a standard deviation of 0,222, which is the largest value found from fatigue tests of spheroidal graphite cast iron pressure vessels, are given in Table H2.

Table H.2 — Values of *F*

Number of tests	*F*
3	105,3
4	22,6
5	12,6
6	9,4
7	7,8
8	6,9
9	6,3
10	5,8

If a lower value for the standard deviation of $\log N$ =0,222 is obtained in the test, it may be applied.

Annex Y
(informative)

Differences between EN 13445-6:2002 and EN 13445-6:2009

The 2009 edition of EN 13445-6 contains the 2002 edition of the standard and all Amendments and corrections issued in the meantime.

The most important changes include:

— Inclusion of austenitic cast iron;

— Update of material properties;

— Increase of allowable design parameters and maximum energy content;

— Redefinition of equivalent full pressure cycles for static loading;

— Inclusion of design by analysis for castings;

— Introduction of dynamic loading for spheroidal graphite cast iron;

— Inclusion of assessment of fatigue life, including an experimental cyclic pressure testing loading;

— Inclusion of specific design requirements frequently used in cast design;

Annex ZA
(informative)

Relationship between this European Standard and the Essential Requirements of the EU Pressure Equipment Directive 97/23/EC

This European Standard has been prepared under a mandate given to CEN by the European Commission and the European Free Trade Association to provide a means of conforming to Essential Requirements of the New Approach Pressure Equipment Directive 97/23/EC.

Once this standard is cited in the Official Journal of the European Union under that Directive and has been implemented as a national standard in at least one Member State, compliance with the clauses of this standard given in Table ZA.1 confers, within the limits of the scope of this standard, a presumption of conformity with the corresponding Essential Requirements of that Directive and associated EFTA regulations.

Table ZA.1 — Correspondence between this European Standard and Pressure Equipment Directive 97/23/EC

Clause(s)/subclause(s) of this EN	Essential Requirements (ERs) of Pressure Equipment Directive 97/23/EC	Qualifying remarks/Notes
4.1, 4.2, 5.2, Annex D, Annex E, Annex G	2.2.3	Calculation method
5.2.2.1.5 and 5.2.2.1.6, Annex H	2.2.4	Experimental design method
5.3, 6, 7.1	3.1	Manufacturing procedures
9.1	3.1.5	Traceability
7.2	3.2	Final assessment
7.1	3.2.1	Testing
7.2.2	3.2.2	Proof test
9	3.3	Marking
5.1, Annex A	4.1	Materials for pressurized parts

WARNING: Other requirements and other EU Directives may be applicable to the product(s) falling within the scope of this standard.

Bibliography

[1] Gorsitzke, B.: Berechnung der Ermüdungslebensdauer wechselbeanspruchter Druckbehälter aus Gusseisen mit Kugelgrafit .

[2] Kikkert, J. Bepaling van de elasticiteitsgrens van verschillende nodulaire gietijzersoorten op verhoogde temperatuur

[3] ISO/CD 1083, *Spheroidal graphite cast iron* (2001-01-18)

[4] EN 13068-1:1999, *Non-destructive testing — Radiographic testing — Part 1: Quantitative measurement of imaging properties*

[5] EN 13068-2 :1999, *Non-destructive testing — Radiographic testing — Part 2: Check of long term stability of imaging devices*

[6] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen. Schiele & Schön, 1995

[7] SFS 3320, Design of pressure vessels — Dished cover

[8] ISO 12107:2003 — *Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data*

Приложение Д.А
(справочное)

Перевод европейского стандарта EN 13445-6:2009 на русский язык

1 Область применения

Настоящий европейский стандарт устанавливает требования к конструкции, материалам, изготовлению и испытаниям сосудов и элементов сосудов, работающих под давлением, предназначенных к использованию при максимальном допустимом давлении PS, меньшем либо равном 100 бар, и толщинах стенки оболочки не более 60 мм, которые изготовлены из ферритного или аустенитного чугуна с шаровидным графитом. Ограничение толщины оболочки не относится к толщине фланцев, элементов жесткости, бобышек и т. д.

К допустимым маркам не относятся марки чугуна с пластинчатым графитом для ферритных и аустенитных марок, которые явно исключены из настоящего европейского стандарта по причине малого удлинения и хрупких свойств материала, что требует использования других коэффициентов надежности и другого подхода.

Примечание 1 – Аустенитные марки чугуна с шаровидным графитом преимущественно используются для работы при высоких и низких температурах благодаря своим антикоррозийным свойствам.

Примечание 2 – Допустимые марки чугуна с шаровидным графитом перечислены в таблицах 3 и 4. Условия эксплуатации приведены в разделе 4.

2 Нормативные ссылки

Следующие ссылочные стандарты необходимы для применения настоящего стандарта. Для датированных ссылок применима только указанная редакция. Для недатированных ссылок применимо последнее издание публикации, на которую дается ссылка (с учетом поправок).

EN 764-2:2002 Оборудование, работающее под давлением. Часть 2. Величины, символы и единицы

EN 764-5:2002 Оборудование, работающее под давлением. Часть 5. Документы по контролю и соответствию металлических материалов

EN 837-1:1996 Приборы для измерения давления. Часть 1. Приборы для измерения давления с трубчатыми пружинами. Размеры, методика измерений, технические требования и методы испытаний

EN 837-3:1996 Приборы для измерения давления. Часть 3. Приборы для измерения давления с мембранными и трубчатыми пружинами. Размеры, методика измерений, технические требования и методы испытаний

EN 1369:1996 Литье. Магнитопорошковая дефектоскопия

EN 1370:1996 Литье. Контроль шероховатости поверхности с помощью визуально-тактильных компараторов

EN 1371-1:1997 Литье. Контроль методом проникающих жидкостей. Часть 1. Отливки, полученные в песчаной форме, кокильные отливки и отливки, полученные под давлением с применением вакуума

EN 1559-1:1997 Производство литейное. Технические условия поставки. Часть 1. Общие положения

EN 1559-3:1997 Производство литейное. Технические условия поставки. Часть 3. Дополнительные требования к чугунным отливкам

EN 1563:1997, EN 1563:1997/A1:2002, EN 1563:1997/A2:2005 Литье. Чугун с шаровидным графитом

EN 12680-3:2003 Отливки. Ультразвуковой контроль. Часть 3. Отливки из чугуна с шаровидным графитом

EN 12681:2003 Отливки. Радиографический контроль

EN 13445-1:2009 Сосуды, работающие под давлением, без огневого подвода теплоты. Часть 2. Общие положения

EN 13445-3:2009 Сосуды, работающие под давлением, без огневого подвода теплоты. Часть 3. Проектирование

EN 13445-5:2009 Сосуды, работающие под давлением, без огневого подвода теплоты. Часть 5. Контроль и испытания

EN 13835:2002, EN 13835/A1:2006 Литье. Чугун аустенитный

EN ISO 945:1994 Чугун. Условные обозначения микроструктуры графита (ISO 945:1975)

EN ISO 8062-1:2007 Характеристики изделий геометрические (GPS). Допуски на размеры и геометрические допуски для литых деталей. Часть 1. Словарь (ISO 8062-1:2007)

EN ISO 8062-3:2007 Характеристики изделий геометрические (GPS) Допуски на размеры и геометрические допуски для литых деталей. Часть 3. Общие допуски на размеры, геометрические допуски и припуски на обработку для отливок (ISO 8062-3:2007)

3 Термины, определения, единицы и символы

3.1 Термины и определения

В настоящем европейском стандарте применяются следующие термины и определения:

3.1.1 критическая зона (critical zone): Область высокого напряжения, где ожидается разрушение при испытании на разрыв или где ожидается образование поверхностных усталостных трещин из-за нагрузок колебаний давления.

Примечание 1 – Критические зоны могут быть обусловлены, например, одной из следующих причин:
– резкое изменение поперечного сечения;
– острые края;
– малые радиусы;
– пиковые напряжения;
– изгибающие напряжения;
– напряжения, вызванные не мембранным напряжением;
– изменение кривизны.

Примечание 2 – Анализ критической зоны выполняется любым соответствующим методом, например голографическим, интерферометрическим, тензометрическим методами, испытаниями на разрыв, испытаниями на усталость, анализом методом конечных элементов и т. п.

Примечание 3 – Кроме того, тепловые градиенты и тепловые напряжения, вызванные перепадом рабочих температур стенки, должны быть учтены при определении критических зон.

3.1.2 покупатель (purchaser): Лицо или организация, покупающие оборудование, работающее под давлением, включая узлы или элементы, для собственного использования либо от имени потребителя и/или пользователя.

3.1.3 изготовитель (manufacturer): Лицо или организация, ответственные за проектирование, изготовление, испытание, контроль, установку оборудования, работающего под давлением, и узлов, если применимо.

Примечание 1 – Изготовитель может привлечь субподрядчика для выполнения одной или нескольких вышеупомянутых задач под свою ответственность.

Примечание 2 – В государствах – членах ЕС изготовитель несет ответственность за обеспечение соответствия Директиве 97/23/ЕС по оборудованию, работающему под давлением. Для изготовителей за пределами ЕС эту ответственность берет на себя их уполномоченный представитель в ЕС.

3.1.4 изготовитель отливок (casting manufacturer): Субподрядчик, изготавливающий отливки, используемые при производстве оборудования, работающего под давлением.

3.1.5 коэффициент контроля (testing factor): Понижающий коэффициент, применяемый к номинальному расчетному напряжению, чтобы учесть возможные производственные недостатки.

3.1.6 температурный коэффициент (temperature factor): Понижающий коэффициент, применяемый к 0,2%-ному условному пределу текучести, чтобы учесть влияние температуры.

3.1.7 коэффициент толщины стенки (wall thickness factor): Понижающий коэффициент, применяемый к номинальному расчетному напряжению, чтобы учесть уменьшение механических свойств.

3.1.8 ферритный чугун с шаровидным графитом (ferritic spheroidal graphite cast iron): Литейный материал на железоуглеродной основе (углерод присутствует главным образом в форме частиц шаровидного графита) с преимущественно ферритной матрицей.

3.1.9 аустенитный чугун с шаровидным графитом (austenitic spheroidal graphite cast iron): Литейный материал с аустенитной матрицей на железоуглеродной основе, легированной никелем и марганцем, медью и/или хромом, чтобы стабилизировать аустенитную структуру при комнатной температуре.

3.2 Единицы

В настоящей части применяются единицы, приведенные в EN 764-2:2002.

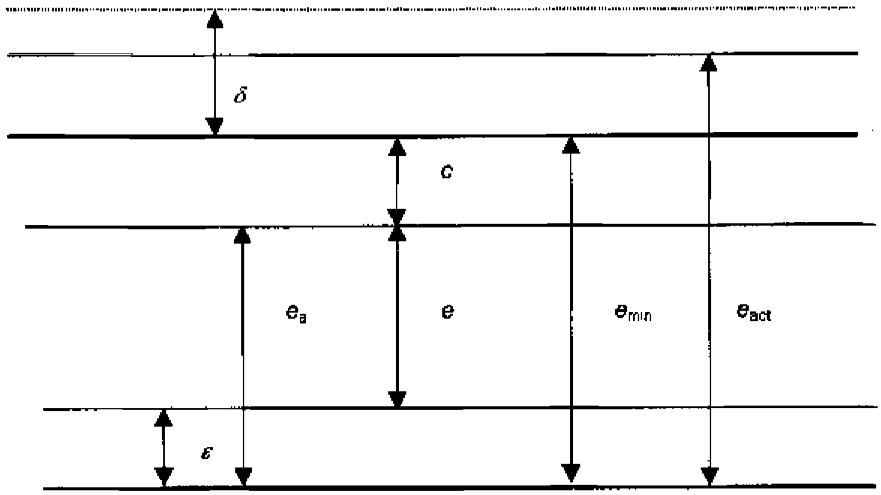
3.3 Символы

Символы, используемые в настоящем европейском стандарте, перечислены в таблице 3.3-1.

Таблица 3.3-1 – Символы

Символ	Величина	Единица
c	Припуск на коррозию	мм
e	Требуемая толщина	мм
e_a	Расчетная толщина	мм
e_{act}	Фактическая толщина	мм
e_{min}	Минимальная толщина по чертежу	мм
E	Модуль упругости	МПа
f	Номинальное расчетное напряжение	МПа
F	Коэффициент усталости по отношению к сохранению работоспособности 99,8 %	–
$P_{b,act}$	Фактическое давление испытания на разрыв	МПа [a]
P_b	Минимальное требуемое давление разрыва	МПа [a]
P_d	Расчетное давление	МПа [a]
PS, P_S	Максимально допустимое давление	МПа [a]
PT, P_t	Давление испытаний	МПа [a]
RM	Параметр прочности материала	МПа
$R_{p0,2}$	0,2%-ный условный предел текучести	МПа
R_m	Прочность на растяжение	МПа
$R_{m(3)}$	Средняя прочность на растяжение трех прутков для испытаний, взятых из одной и той же партии или плавки	МПа
TS_{min}, TS_{max}	Минимально/максимально допустимая температура	°C
T	Вычислительная температура	°C
V	Объем	л
C_e	Коэффициент толщины стенки	–
C_T	Температурный коэффициент	–
C_Q	Коэффициент контроля	–
n	Коэффициент, зависящий от формы оболочки	–
f_e	Поправочный коэффициент толщины	–
f_m	Поправочный коэффициент среднего напряжения	–
f_s	Поправочный коэффициент чистоты поверхности	–
S	Коэффициент надежности	–
γ_R	Частный коэффициент надежности	–
δ	Допуск отливки	мм
ε	Припуск толщины вследствие процесса литья	мм
ν	Коэффициент Пуассона	–
[a] МПа используется только для расчетов, для других целей служит единица бар (1 МПа = 10 бар).		

3.4 Взаимосвязь определений толщин



e – требуемая толщина;
e_a – расчетная толщина;
e_{min} – минимальная толщина с учетом припуска на коррозию по чертежам;
e_{act} – фактическая толщина;
c – припуск на коррозию;
ε – припуск толщины вследствие процесса литья;
δ – допуск отливки

Рисунок 3.4-1 – Взаимосвязь определений толщин

4 Условия эксплуатации

4.1 Циклические нагрузки

Сосуды и элементы сосудов, работающие под давлением, из чугуна с шаровидным графитом могут быть использованы для циклической эксплуатации, если коэффициент напряжений ограничивается значением 3. Если расчетное количество циклов близко к предельному количеству циклов, указанному в таблице 4.1-1 для определения необходимости усталостного расчета, то при этом определении необходимо использовать модель наихудшего случая.

Если предполагается, что в условиях эксплуатации максимальное количество полных циклов давления превысит предельное количество согласно таблице 4.1-1 либо превысит эквивалентное количество циклов с меньшей амплитудой, то необходимо выполнить усталостный расчет в соответствии с приложением D.

Таблица 4.1-1 – Количество полных циклов давления для рассмотрения циклических нагрузок

Коэффициент контроля	Максимальное количество полных циклов давления без обязательного усталостного расчета согласно приложению D	
$C_Q = 0,9$	1 000	
$C_Q = 0,8$	40 000	если 2,5 < коэффициента напряжений ≤ 3
	200 000	если коэффициент напряжений ≤ 2,5

Примечание 1 – Коэффициент контроля 0,9 предполагает применение более высоких номинальных расчетных напряжений, а следовательно, обусловливает более низкое максимальное количество полных циклов давления без обязательного усталостного расчета.
Примечание 2 – Коэффициент напряжений (отношение пикового напряжения к напряжению усталости) более 3, определенный любым из методов проектирования, указанных в 5.2, может быть результатом ненадлежащего проектирования. Посредством увеличения радиусов или внесения других небольших изменений можно обеспечить приемлемую конструкцию.

Для циклов давления при перепаде давления ΔP_i менее полного давления количество эквивалентных полных циклов находят по формуле:

$$n_{eq} = \sum_{i=1}^{i=N} n_i \cdot \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}} \right)^{8,6}, \qquad (4.1\text{-}1)$$

где N – общее количество предусмотренных типов циклов давления с различной амплитудой;
n_i – количество циклов с амплитудой ΔP;
ΔP_i – амплитуда цикла давления;
P_{max} – максимально допустимое давление согласно п. 3.15 EN 13445-3:2009.

4.2 Ограничения по температуре и энергосодержанию

Минимально и максимально допустимые температуры TS_{min} и TS_{max} должны соответствовать пределам, приведенным в таблицах 5.1-1 и 5.1-2.

Произведение $PS \cdot V$ для отдельной отливки не должно превышать 100 000 бар·л.

5 Требования

5.1 Материалы

Все марки чугуна, подверженные воздействию внутреннего или внешнего давления, должны соответствовать EN 1563 для ферритного чугуна с шаровидным графитом и EN 13835 для аустенитного чугуна с шаровидным графитом.

Ферритные марки материала, приведенные в таблице 5.1-1, используются там, где минимально допустимая температура больше либо равна –10 °С.

Марки материала, приведенные в таблице 5.1-2, предназначены для расчетных условий низкой или высокой температуры.

Таблица 5.1-1 – Допустимые марки материала для обычных расчетных температур (от –10 °С до 300 °С)

Стандарт на материал	Наименование материала [b]		Диапазон расчетных температур, °С
	Обозначение	Номер	
EN 1563	EN-GJS-350-22	EN-JS1010	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-350-22 U [a]	EN-JS1032	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-350-22U-RT [a]	EN-JS1029	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-400-18	EN-JS1020	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-400-18U [a]	EN-JS1062	$-10 \le TS \le 300$
	EN-GJS-400-18U-RT [a]	EN-JS1059	$-10 \le TS \le 300$

[a] Механические свойства проверены на образцах для испытаний из прилитых образцов. Этим маркам следует отдавать предпочтение перед марками материала с отдельно отлитыми образцами, если единичная масса отливки больше либо равна 2 000 кг или если соответствующая толщина стенки варьирует от 30 до 200 мм.

Марки материала, приведенные в таблицах 5.1-1 и 5.1-2, могут быть получены в состоянии непосредственно после отливки или состоянии термической обработки (см. EN 1563:1997, раздел 6).

[b] При отсутствии материалов, указанных в этих таблицах, можно использовать другие подходящие материалы, если техническая документация, определяющая характеристики материалов, была принята в соответствии с требованиями к Европейскому разрешению на материалы (EAM) или оценке конкретного материала (PMA).

Таблица 5.1-2 – Допустимые марки материала для расчетных условий низких или высоких температур

Стандарт на материал	Наименование материала [b]		Диапазон расчетных температур, °С
	Обозначение	Номер	
EN 1563	EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	$-40 \le TS \le 300$
	EN-GJS-350-22U-LT [a]	EN-JS1019	$-40 \le TS \le 300$
	EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	$-20 \le TS \le 300$
	EN-GJS-400-18U-LT [a]	EN-JS1049	$-20 \le TS \le 300$
EN 13835	EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	$-196 \le TS \le 300$
	EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	$-40 \le TS \le 540$
	EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	$-40 \le TS \le 300$

[a] Механические свойства проверены на образцах для испытаний из прилитых образцов. Этим маркам следует отдавать предпочтение перед марками материала с отдельно отлитыми образцами, если единичная масса отливки больше либо равна 2 000 кг или если соответствующая толщина стенки варьирует от 30 до 200 мм.

Марки материала, приведенные в таблицах 5.1-1 и 5.1-2, могут быть получены в состоянии непосредственно после отливки или состоянии термической обработки (см. EN 1563:1997, раздел 6, и EN 13835:2002, раздел 6).

[b] При отсутствии материалов, указанных в этих таблицах, можно использовать другие подходящие материалы, если техническая документация, определяющая характеристики материалов, была принята в соответствии с требованиями к Европейскому разрешению на материалы (EAM) или оценке конкретного материала (PMA).

Марки материала EN-GJS-350-22-LT или EN-GJS-350-22U-LT могут использоваться при нижней границе расчетных температур –60 °С. При использовании от (–40 ± 2) °С до (–60 ± 2) °С испытания на удар при минимальной расчетной температуре должны обеспечивать:

– среднее значение из трех опытов 12 Дж при $e_{act} \le 60$ мм;

– 10 Дж при 60 мм $\le e_{act} \le$ 200 мм;

– единичное значение 9 Дж при $e_{act} \le 60$ мм и 7 Дж при 60 мм $\le e_{act} \le$ 200 мм.

Также действуют применимые требования к условиям поставки, приведенные в EN 1559-1:1997 и EN 1559-3:1997.

Примечание – Использование материалов, работающих в интервале ползучести, не относится к настоящему стандарту, поскольку диапазоны напряжений ограничены упругими свойствами.

5.2 Проектирование

5.2.1 Техническая документация

Изготовитель должен документально оформить положения, указанные в разделе 5 EN 13445-5:2009, до начала изготовления.

5.2.2 Методы проектирования

5.2.2.1.1 Принцип

Нагрузки, подлежащие учету, должны соответствовать EN 13445-3:2009 (раздел 5).

Необходимо учесть условия эксплуатации в разделе 4.

Методы проектирования должны соответствовать настоящему европейскому стандарту и, где необходимо, соответствующим разделам EN 13445-3:2009.

Если геометрия элемента или сочетание нагрузок не позволяют выполнить расчет при помощи формул, приведенных в EN 13445-3:2009 и приложении G, применяют проектирование путем расчетов (DBA) (см. приложение E) или экспериментальное проектирование (DBE).

В зависимости от сложности элемента, условий нагружения и уровня неразрушающего контроля проектировщик может выбрать один из следующих имеющихся методов проектирования, упомянутых ниже. Приводятся указания по корреляции между коэффициентом надежности, коэффициентом контроля и методом оценки динамических нагрузок (см. таблицу 5.2-1).

5.2.2.1.2 Статические нагрузки

Для проектирования детали на статические нагрузки проектировщик может рассмотреть следующие варианты.

5.2.2.1.3 Проектирование с использованием формул (DBF)

Выражения для расчета различных элементов частей, работающих под давлением, приведены в EN 13445-3:2009 и приложении G. В приложении G приводятся дополнительные выражения для частей нестандартной формы, часто используемых в литых конструкциях.

5.2.2.1.4 Проектирование путем расчетов (DBA)

Действуют следующие положения:

1) выбрать используемый способ: прямой (предельная нагрузка – EN 13445-3:2009, приложение B) или метод категоризации напряжений (EN 13445-3:2009, приложение C). Выбрать, будет ли использоваться линейный или нелинейный подход;

2) базовое моделирование и представление результатов расчетов должно основываться на расчетных толщинах (e_a) и характеристиках материала при рабочей температуре;

3) для представления результатов расчетов нужно следовать процедурам и критериям оценки с целью определения пригодности для реальной конструкции. Эти проектные проверки и соответствующие процедуры являются стандартными для рассматриваемого режима разрушения. Различные режимы разрушения см. в EN 13445-3:2009.

5.2.2.1.5 Экспериментальное проектирование (DBE)

Если проектирование с использованием формул согласно EN 13445-3:2009 признано нецелесообразным вследствие сложной формы элемента, то для определения расчетной толщины e_a и минимальной толщины e_{min} необходимо провести гидравлические испытания на разрыв в соответствии с процедурой 5.2.2.1.6. Эти испытания также являются частью технической документации.

Этот метод проектирования может быть использован без дополнительных расчетов, если $P_d \cdot V < 6\,000$ бар·л.

Если $P_d \cdot V > 6\,000$ бар·л для всего сосуда, этот метод может быть использован в дополнение к методам DBA и DBF.

Минимальную требуемую толщину в определенном месте находят по формуле:

$$e_a = e_{act} \cdot \left(\frac{S \cdot PS \cdot R_{m(3)}}{P_{b,act} \cdot R_{p0,2} \cdot C_Q \cdot C_T \cdot C_e} \right)^{1/n}, \quad (5\text{-}1)$$

$$e_{min} \geq e_a + c, \quad (5\text{-}2)$$

где e_{act} – минимальная измеренная толщина стенки в конкретном месте;

$R_{p0,2}$ – в соответствии с приложением A;

$P_{b,act}$ – фактическое полученное значение давления разрыва или наивысшее давление в процессе испытаний;

$n = 1$ – для криволинейных поверхностей (цилиндров, сфер) или конусов с углами $\alpha \leq 60°$, поверхностей с оттяжками и напряженных частей, если изгибающее напряжение составляет менее $^2/_3$ суммарного напряжения;

$n = 2$ – для всех прочих поверхностей.

5.2.2.1.6 Определение гидравлического давления разрыва и максимально допустимое давление для статического нагружения

Случайный образец с производства сосуда или элемента сосуда, работающего под давлением, отбирают для испытаний на разрыв или для определения максимально допустимых рабочих условий. Процедура должна быть следующей:

1) проверить, что испытуемый сосуд или его часть отлиты в соответствии с указанным чертежом с учетом всех поправок. Используемый материал должен быть того же типа и марки, что и для заводской детали;

2) проверить, что сосуд или его часть прошли механическую обработку по тем же размерам, что и заводская деталь;

3) проверить, что свойства материала отвечают требованиям 5.1. Для каждой отливки, используемой для испытаний на разрыв, необходимо отлить и испытать отдельно три образца для испытаний на растяжение и, если применимо, для испытаний на удар. Результаты и вычисленная средняя прочность на растяжение должны быть сертифицированы в соответствии с 6.5;

4) измеряют толщины стенки всей отливки (не менее одного измерения на 100 × 100 мм). Результаты должны быть отмечены на отливке в месте измерения или на чертеже;

5) проверить, что используется калиброванный манометр; максимальная ошибка должна соответствовать по меньшей мере классу 1 согласно EN 837-1 и EN 837-3. Шкала манометра должна составлять примерно $^4/_3$ предполагаемого давления разрыва;

6) давление необходимо контролируемо увеличивать до достижения минимального требуемого давления разрыва:

$$P_b \geq PS \cdot \frac{R_{m(3)}}{f}\left(\frac{e_{act}}{e_{min} - c}\right)^n. \quad (5\text{-}3)$$

Давление далее контролируемо увеличивают до разрыва. Записывают давление разрыва $P_{b,act}$, дату испытаний, спецификацию материала, подробные данные о материале, номер детали и толщину стенки e_{act}, измеренные в месте разрыва. Выражение с фактическим давлением разрыва $P_{b,act}$, которое может превышать P_b вследствие лучшего распределения напряжений, и максимально допустимым давлением PS можно вывести, преобразовав формулу 5-3 и заменив P_b на $P_{b,act}$

$$PS \leq P_{b,act} \cdot \frac{f}{R_{m(3)}}\left(\frac{e_{min} - c}{e_{act}}\right)^n; \quad (5\text{-}4)$$

7) если деталь не отвечает какому-либо из этих требований, вторая идентичная заводская деталь может быть подвергнута той же процедуре испытаний. Если эта вторая деталь отвечает требованиям испытаний, то эта деталь может быть принята после исследования причины несоответствия первой детали. Если вторая деталь не отвечает требованиям испытаний, конструкцию детали признают не соответствующей техническим условиям;

8) в процессе испытаний на разрыв допускается наличие утечек и неплотностей между деталями с фланцами, прокладками и болтовыми соединениями, если возможно достижение давления P_b в процессе испытаний. Допускается разрушение прокладки (прокладок) в процессе испытаний на разрыв; их характеристики могут быть скорректированы без излишнего изменения прочностных свойств фланца при условии, что их конструкция отвечает правилам проектирования EN 13445-3:2009 для предполагаемого максимально допустимого давления P_s;

9) только для испытаний могут быть приняты болты с большей механической прочностью, чем требуется техническими условиями на проектирование;

10) если фланцевые соединения спроектированы в соответствии с требованиями EN 13445-3:2009 в отношении минимальной требуемой толщины, минимальной требуемой площади и формы болтов, допускается установка дополнительных болтов в дополнение к их количеству, указанному для производства, чтобы достичь давления испытаний на разрыв;

11) разрыв под давлением испытаний или любое гидравлическое испытание не должно выполняться посредством конструкции на гидравлическом прессе, которая может противодействовать свободному изгибу оболочки под давлением.

5.2.2.1.7 Динамические нагрузки

Если количество полных циклов давления или эквивалентных полных циклов давления согласно формуле (4.1-1) превышает количество полных циклов давления для статических нагрузок, рассмотренных в таблице 4.1-1, требуется оценка усталости всей конструкции. С целью проектирования детали на динамические нагрузки проектировщик может рассмотреть следующие варианты.

5.2.2.1.8 Упрощенная оценка усталости (SFA)

При упрощенной оценке усталости будет получено значение максимально допустимого количества эквивалентных колебаний давления в условиях эксплуатации. Оценку выполняют в соответствии с приложением D. Предполагается максимальный коэффициент напряжений 3, за исключением деталей конструкции, ограниченных в таблице D.1A, для которых возможно использование значений, меньших либо равных 3.

Примечание – Таблица D.1A также может использоваться для отливок из металла, отличного от чугуна с шаровидным графитом (например, литейная сталь, литейный алюминий и т. п.).

5.2.2.1.9 Подробная оценка усталости (DFA)

При подробной оценке усталости получают значение максимально допустимого количества эквивалентных колебаний давления с использованием подробного расчета напряжений в условиях эксплуатации. Оценку выполняют в соответствии с приложением D.

5.2.2.1.10 Экспериментальная оценка усталости (EFA)

Этот метод, описанный в приложении H, используют, если теоретический расчет напряжений неадекватен или если проектный расчет дает аномально низкие величины усталостной долговечности, указывая на слишком консервативный теоретический подход.

Оценка детали посредством экспериментального проектирования на усталость не требуется, если похожая деталь уже прошла такую оценку усталости и имеются данные, переносимые на новую конструкцию.

Циклические нагрузки должны соответствовать EN 13445-3:2009 (подраздел 5.3).

Этот метод не учитывает излишней толщины стенки материала, футеровки и всего материала, который не увеличивает прочности.

Примечание – Для сосудов при $P_d \cdot V \geq 6\ 000$ бар·л этот экспериментальный метод можно использовать в дополнение к подробному проектированию на усталость.

Таблица 5.2-1 – Определение коэффициента надежности, коэффициента контроля и метода проектирования

Неразрушающий контроль	Коэффициент надежности S	Коэффициент контроля C_Q	Метод проектирования. Статические нагрузки	Оценка проектирования. Динамические нагрузки
Не требуется	3,0	0,8	DBF DBA DBE	SFA
				DFA
				EFA
Требуется	2,0	0,9		(SFA) [a]
				DFA
				EFA
Примечание – DBF – проектирование с использованием формул; DBA – проектирование путем расчетов; DBE – экспериментальное проектирование; SFA – упрощенный расчет усталости; DFA – подробный расчет усталости; EFA – экспериментальный расчет усталости.				
[a] Не рекомендуется.				

5.2.2.2 Условия проектирования

Расчетное напряжение для ферритных и аустенитных марок вычисляют по формуле

$$f = \frac{R_{p0,2} \cdot C_T \cdot C_Q \cdot C_e}{S}, \quad (5.2\text{-}1)$$

где 0,2%-ный условный предел текучести при вычислительной температуре:

$$R_{p0,2/T} = C_T \cdot R_{p0,2}. \quad (5.2\text{-}2)$$

Понижающий температурный коэффициент C_T составляет:
для ферритных марок

$$C_T = 1 \text{ при } T \leq 20\ °C; \quad (5.2\text{-}3)$$

$$C_T = 1 - 0{,}001\ (T - 20) \text{ при } 20\ °C < T \leq 200\ °C; \quad (5.2\text{-}4)$$

$$C_T = 0{,}82 \text{ при } 200\ °C < T \leq 300\ °C \quad (5.2\text{-}5)$$

и для аустенитных марок

$$C_T = 1 \text{ при } T \leq 20\ °C; \quad (5.2\text{-}6)$$

$$C_T = 1 - 0{,}000\ 5\ (T - 20) \text{ при } 20\ °C < T \leq 540\ °C. \quad (5.2\text{-}7)$$

Понижающий коэффициент толщины стенки:

$$C_e = 1 \text{ при } e_{min} \leq 60\ мм; \quad (5.2\text{-}8)$$

$$C_e = 0{,}8 \text{ при } 60\ мм < e_{min} \leq 200\ мм. \quad (5.2\text{-}9)$$

5.2.2.3 Условия испытаний

Давление испытаний случайно или намеренно может превышать значение, полученное по формуле 7.2-1. Однако номинальное расчетное напряжение для условий испытаний $f_{исп}$ не должно превышать 0,2%-ный условный предел текучести $R_{p0,2/T_{исп}}$ с поправкой на коэффициент C_e при температуре испытаний, разделенный на коэффициент надежности 1,33.

$$f_{исп} = \frac{R_{p0,2/T_{исп}} \cdot C_e}{1{,}33}. \qquad (5.2\text{-}10)$$

5.2.2.4 Усиление отверстий в цилиндрах, плоских днищах, выпуклых днищах, конусах и т. п.

Усиление отверстий в цилиндрах, плоских днищах, выпуклых днищах, конусах и т. п. определяют в соответствии с EN 13445-3:2009. При расчете усиления методом замены площади длина усиления вдоль рассматриваемой стенки сосуда должна быть $\leq 2e_{min}$ для расчета дополнительной площади усиления.

5.2.2.5 Проектирование на внешнее давление

Проектирование на внешнее давление выполняют в соответствии с EN 13445-3:2009 (раздел 8), где

$$f = R_{p0,2/T} \cdot C_Q \cdot C_e \qquad (5.2\text{-}11)$$

и

$$S = 3{,}5. \qquad (5.2\text{-}12)$$

5.2.2.6 Радиус галтели

Наибольший возможный радиус галтели используют для стенок под действием внутреннего и внешнего давления в соответствии с правильными методами литейных работ (необходимо учесть допуски на изготовление). Правильные методы литейных работ иногда требуют увеличения толщины стенки и выбора соответствующего радиуса галтели. Поэтому детали, отлитые в соответствии с настоящим европейским стандартом, демонстрируют улучшенные усталостные свойства. Важно проверить, чтобы местные напряжения никогда не превышали максимальных допустимых значений, особенно при изменении толщины сечения или при изменении радиусов.

Если по какой-либо причине невозможно избежать резких изменений площади поперечного сечения и стенка, воспринимающая давление, подвергается циклическим нагрузкам, то необходимо предусмотреть сужение с максимальным отношением 1 : 3 от тонкой стенки к толстой стенке.

Все радиусы, применяемые к элементу сосуда, включая наружные литые бобышки, опоры и т. п., должны быть больше либо равны 1,5 толщины самой тонкой прилегающей стенки.

Если по какой-либо причине применяется меньший радиус (непосредственно после отливки или после механической обработки), то проверку проектирования выполняют методом DBA.

5.3 Литье

5.3.1 Общие положения

Отливки не должны иметь поверхностные и внутренние дефекты, которые могут отрицательно повлиять на их эксплуатационную пригодность. Не допускается возникновение в отливке чрезмерных остаточных напряжений, которые могут ухудшить поведение при разрушении или усталостную долговечность отливки. Это достигается посредством существенного увеличения времени охлаждения отливки в форме с последующим охлаждением на неподвижном воздухе. Изготовитель отливки должен документально зафиксировать процедуру охлаждения (требуемое время охлаждения) в технологической или рабочей инструкции. Если невозможно обеспечить выполнение этой процедуры, исключающей чрезмерные остаточные напряжения, необходимо выполнить термическую обработку для снятия напряжений по согласованию между заинтересованными сторонами.

5.3.2 Сварка

Не допускается выполнение рабочей, ремонтной или косметической сварки чугунных деталей из ферритных и аустенитных марок, изготовленных в соответствии с настоящим европейским стандартом.

6 Испытания материала

6.1 Общие положения

Все испытания материалов, требуемые по EN 1563 или EN 13835, должны быть проведены.

6.2 Частота и количество испытаний

Для каждой партии проводятся следующие испытания по каждой плавке, прошедшей сфероидизирующую обработку, или по каждой партии термической обработки:

– химический анализ;

– одно испытание на растяжение;

– одно испытание на твердость;

– испытание на удар, если требуется техническими условиями на материал (испытываются три образца).

Если сфероидизирующая обработка выполняется в форме, проводят те же испытания для каждых 2 500 кг массы отливок идентичных деталей, изготовленных в тот же день.

При серийном изготовлении марок RT согласно таблице 5.1-1 количество испытаний на удар можно уменьшить до одного испытания в день для плавки с самым высоким содержанием кремния.

Выбирают отдельно отлитые или прилитые образцы для испытаний в соответствии с EN 1563 или EN 13835. Размер образца для испытаний должен представлять толщину стенки детали (определение размера см. в EN 1563 или EN 13835).

Примечание – Прилитые образцы для испытаний репрезентативны для отливок, с которыми они связаны, а их размер зависит от соответствующей толщины стенки отливки.

6.3 Химический анализ

Методы, используемые для определения химического состава материала, должны соответствовать признанным стандартам.

Для ферритного чугуна с шаровидным графитом анализируются следующие элементы: C, Si, Mn, P, S и Mg.

Для аустенитного чугуна с шаровидным графитом анализируются следующие элементы: C, Si, Mn, P, S, Mg, Cu и Ni.

6.4 Структура графита

Морфология графита материала должна соответствовать форме VI и V по EN ISO 945. Проверка шаровидности предпочтительно выполняется посредством микроскопического исследования либо ультразвуковым методом. Допускаются визуальные или компьютеризированные и/или автоматизированные методы.

При использовании ультразвукового метода скорость звука должна составлять минимум 5 460 м/с при измерении калиброванным измерительным прибором. При скорости менее 5 460 м/с шаровидность можно проверить и подтвердить путем исследования наихудшего образца для испытаний с использованием микроскопического метода. Если сфероидизация признана приемлемой, материал проходит утверждение. При использовании ультразвукового исследования проверку выполняют на последнем отлитом металле каждой плавки.

6.5 Документы контроля

Документы контроля должны соответствовать EN 764-5:2002 (п. 4.3.3).

7 Контроль и окончательная оценка

7.1 Контроль

7.1.1 Общие положения

Весь контроль материалов литых сосудов и элементов сосудов, изготовленных в соответствии с настоящей частью, должен соответствовать таблицам 7.1-1 и 7.1-2.

Таблица 7.1-1 – Требования к контролю

	Коэффициент контроля C_Q	Магнито-порошковый контроль	Ультразвуковой контроль/радио-графический контроль	Секциониро-вание	Визуальный контроль	Измерение толщины стенки
Исходный образец	0,8	–	+	+	+	+
	0,9	+	+	+	+	+
0-серия: досерийное производство	0,8	–	+ (10 %)	–	+	+
	0,9	+	+	+ (1 деталь)	+	+
Серийное про-изводство	0,8	–	–	–	+	+
	0,9	+	–	–	+	+
Примечание – «+» – требуется, «–» – не требуется.						

7.1.2 Требования контроля при C_Q = 0,8

Контроль выполняется в соответствии с требованиями и с применением критериев приемки, приведенных в таблице 7.1-2 только для поверхностных дефектов.

7.1.3 Требования контроля при C_Q = 0,9

– в некритических зонах: контроль как для C_Q = 0,8, как указано в 7.1.2;

– в критических зонах: все отливки подлежат магнитопорошковому контролю всех критических зон, как указано на чертеже, при этом не должны быть обнаружены какие-либо недопустимые дефекты.

Последняя отливка, представляющая партию отливок, изготовленных из одной и той же плавки или в течение одного и того дня, подлежит радиографическому или эквивалентному исследованию (см. сноску [b] в таблице 7.1-2) зоны, указанной на чертеже, при этом не должны быть обнаружены какие-либо недопустимые дефекты.

Таблица 7.1-2 – Контроль согласно коэффициенту контроля

Коэффициент контроля			
	C_Q = 0,8	C_Q = 0,9	
Расположение	Целая деталь	Некритическая зона	Критическая зона
Поверхностные дефекты			
Требование	См. 7.1.4 Трещины, морщины, корольки и несплавленные жеребейки не допускаются См. 7.1.5		
Метод контроля	Визуальный (для C_Q = 0,8 и C_Q = 0,9)		
Частота контроля	100 %		
Дефекты вблизи поверхности			
Требование	Нет требований	Нет требований	См. 7.1.7
Метод контроля	Не применимо	Не применимо	Магнитопорошковый контроль для ферритных марок. Капиллярный контроль для аустенитных марок
Частота контроля	Не применимо	Не применимо	100 %
Внутренние дефекты (микро- и макропористость)			
Требование	См. 7.1.6 (EN 12680-3, уровень жесткости 3)	См. 7.1.6 (EN 12680-3, уровень жесткости 3)	См. 7.1.9
Метод контроля	Ультразвуковой контроль/секционирование	Ультразвуковой контроль/секционирование	Радиографический контроль [b]

Окончание таблицы 7.1-2

Частота контроля	Исходные образцы. Случайные образцы производственной серии [a]	Исходные образцы. Случайные образцы производственной серии [a]	Исходные образцы. Последняя отливка каждой партии

[a] По согласованию между заинтересованными сторонами.
[b] Ультразвуковой контроль отливок может использоваться взамен радиографического контроля по согласованию между заинтересованными сторонами.

7.1.4 Поверхностные дефекты

Вкрапления песка, шлаковые включения и раковины должны быть ограничены следующим образом.

Для C_Q = 0,8 и C_Q = 0,9 – некритическая зона:

Допускается максимум пять дефектов в квадрате 100 × 100 мм в направлении внутрь и наружу. Никакие из них не должны покрывать площадь более 100 мм^2, а суммарная площадь дефектов не должна превышать 200 мм^2.

Максимальная допустимая глубина дефекта должна быть такова, чтобы выдерживалась минимальная толщина стенки. Допускается зачистка таких поверхностных дефектов до минимальной толщины стенки, указанной на чертеже.

C_Q = 0,9 – критическая зона:

Не допускается наличие дефектов в критической зоне. Допускается зачистка поверхностных дефектов до минимальных размеров, указанных на чертеже, при условии отсутствия концентрации напряжений.

7.1.5 Трещины, морщины, корольки и несплавленные жеребейки

Не допускаются видимые трещины, морщины, корольки и несплавленные жеребейки.

В случае сомнений в серьезности дефекта может потребоваться капиллярный контроль в соответствии с EN 1371-1:1997.

7.1.6 Ультразвуковой контроль и/или секционирование

Ультразвуковой контроль должен выполняться в соответствии с EN 12680-3:2003.

Если ультразвуковой контроль практически неосуществим, выполняется секционирование для визуального обнаружения внутренних дефектов.

Не допускаются дефекты на основных частях, находящихся под давлением (сечение отливки с минимальной требуемой толщиной стенки, указанной на чертеже). Однако микроусадка (осевая пористость) допускается при условии выполнения всех требований по механическим свойствам в стандарте на материал.

Примечание – Микроусадка определяется как раковина размером менее 0,5 мм.

На других частях отливки допускаются дефекты, расположенные в центре и не покрывающие площадь 300 мм^2, при условии, что минимальное расстояние от поверхности составляет минимум $^1/_3$ толщины стенки, но не менее 3 мм. Дефекты не допускаются вокруг сверлений или мест под сверление в пределах области с диаметром, равным двум диаметрам отверстия, центр которой совпадает с центром отверстия. Допускается только микроусадка на центральной оси при условии выполнения требуемых механических характеристик стандарта на материал.

7.1.7 Магнитопорошковый контроль (только для ферритных марок)

Испытания проводятся в соответствии с EN 1369:1996. Максимальный уровень жесткости должен быть не ниже SM 3 в таблице 2 EN 1369:1996 и LM4/AM4 в таблице 4 EN 1369:1996.

7.1.8 Капиллярный контроль

Испытания проводятся в соответствии с EN 1371-1:1997. Максимальный уровень жесткости должен быть не ниже SP 02/CP 02 в таблице 2 EN 1371-1:1997 и LP 2/AP 2 в таблице 3 EN 1371-1:1997.

7.1.9 Радиографический контроль

Испытания проводятся в соответствии с EN 12681:2003 на пленке размером не менее 100 × 240 мм.

При любом размере не допускаются:

– пятна, полосы, трещины, горячие надрывы;

– пористость (тип А, класс 5);

– вкрапления песка (тип B, класс 5);
– усадка (тип C, класс 5).

7.1.10 Шероховатость поверхности

Шероховатость отливки или чистота поверхности должна быть утверждена покупателем на образце отливки. Заводские отливки должны иметь шероховатость поверхности, сравнимую с утвержденным образцом.

При необходимости шероховатость поверхности отливки проверяют и указывают согласно EN 1370:1996 с использованием визуально-тактильных компараторов либо согласно указаниям изготовителя.

7.1.11 Минимальная толщина стенки

Отливки измеряют в указанных местах с целью проверки, что достигнута требуемая минимальная толщина стенки.

Результаты должны быть зафиксированы в приложении к сертификату на материал.

Измерение выполняют при помощи ультразвуковых или любых механических приборов с точностью согласно указанным проектным допускам.

7.1.12 Допуски толщины стенки

Изготовитель отливок регулярно устанавливает допуск толщины стенки.

Допуск толщины стенки приводится в соответствии с ISO 8062-3:2003.

Применяемый класс допуска отливки зависит от процесса литья. Изготовитель отливок должен доказать способность обеспечить соответствие согласованным допускам.

7.1.13 Другие размеры

Первоначальные образцы подлежат полной проверке размеров.

В процессе серийного производства соответствующие размеры подлежат регулярному контролю, чтобы гарантировать соответствие чертежу.

7.1.14 Квалификация персонала контроля

Персонал, выполняющий контроль, должен пройти квалификацию в соответствии с EN 13445-5:2009.

7.2 Окончательная оценка

7.2.1 Общие положения

Окончательная оценка выполняется в соответствии с EN 13445-5:2009 (раздел 10), за исключением стандартного давления гидравлических испытаний.

7.2.2 Давление гидравлических испытаний

Все детали из чугуна с шаровидным графитом, находящиеся под давлением, подлежат гидравлическим испытаниям с давлением, большим либо равным:

$$P_t = \frac{1{,}43 \cdot P_d}{C_T \cdot C_Q}. \qquad (7.2\text{-}1)$$

Если узел состоит из деталей из чугуна с шаровидным графитом, спроектированных с различными коэффициентами контроля, необходимо применить наивысшее давление испытаний. Необходимо проверить, чтобы под давлением гидравлических испытаний ни для одной из деталей не было превышено допускаемое напряжение, указанное для этой детали согласно 5.2.2.3.

8 Сосуды, работающие под давлением, содержащие части, изготовленные из различных материалов

Если в сосуде, работающем под давлением, части из чугуна с шаровидным графитом соединены непроницаемым соединением с другими металлическими частями, изготовленными посредством сварки, ковки и т. п., то элементы, изготовленные в соответствии с различными технологиями, должны отвечать требованиям к конструкции, контролю и испытаниям соответствующих разделов EN 13445-5:2009.

Собранный сосуд должен отвечать требованиям к гидравлическим испытаниям при давлении, равном наивысшему давлению испытаний отдельных элементов сборки. Необходимо проверить, чтобы под давлением гидравлических испытаний ни для одного из элементов не было превышено допускаемое напряжение, указанное для этого элемента.

9 Маркировка и документация

9.1 Маркировка отливок

Маркировка отливок сосудов, работающих под давлением, и литых элементов сосудов независимо от коэффициента контроля должна содержать по меньшей мере следующую информацию, предпочтительно в виде литых символов с минимальной высотой 6 мм:

– логотип или идентификационный знак изготовителя отливки;
– тип или наименование;
– марку материала согласно EN 1563:1997 или EN 13835:2002;
– дату отливки, номер формы или партии;
– коэффициент контроля, если C_Q = 0,9.

Литые символы, рельефные, выступающие или заглубленные, не должны оказывать отрицательное влияние на прочность, статическую и динамическую устойчивость или местную концентрацию напряжений сосуда или частей сосуда, работающего под давлением. Вышеописанная маркировка отливки может быть заменена системой условных обозначений, согласованной между заинтересованными сторонами, а также может быть выполнена штамповкой. Должна быть гарантирована полная прослеживаемость детали по материалу и сертификатам испытаний.

9.2 Паспортная табличка для собранного сосуда, работающего под давлением

Маркировка сосуда должна выполняться в соответствии с EN 13445-5:2009 (раздел 11).

9.3 Документация

Письменное заявление о соответствии со стандартом, регистрационными записями и другими значимыми документами должно отвечать EN 13445-5:2009.

Приложение А
(обязательное)

Технические данные для проектных расчетов

А.1 Назначение

В настоящем приложении для допустимых стандартных марок материала ферритного и аустенитного чугуна с шаровидным графитом для сосудов и элементов сосудов, работающих под давлением, приводятся соответствующие значимые технические характеристики, которые используются при проектных расчетах. Обозначение материала и соответствующие требования соответствуют EN 1563 или EN 13835.

При использовании других материалов согласно последнему предложению 5.1 технические характеристики, используемые при расчете, принимают из действующего Европейского разрешения на материалы (EAM) или оценки конкретного материала (PMA).

А.2 Технические характеристики

А.2.1 Ферритный чугун с шаровидным графитом в соответствии с EN 1563:1997

Таблица А.2.1-1 – Технические характеристики ферритного чугуна с шаровидным графитом

Обозначение материала		0,2%-ный условный предел текучести $R_{p0,2}$, МПа	Модуль упругости E, 10^3 МПа	Коэффициент Пуассона ν	Плотность, кг/дм^3
Символ	Номер				
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	220	169	0,275	7,1
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014				
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015				
EN-GJS-350-22U	EN-JS1032				
EN-GJS-350-22U-RT	EN-JS1029				
EN-GJS-350-22U-LT	EN-JS1019				
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	250			
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024				
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	240			
EN-GJS-400-18U	EN-JS1062	250			
EN-GJS-400-18U-RT	EN-JS1059				
EN-GJS-400-18U-LT	EN-JS1049	240			

Таблица А.2.1-2 – Влияние расчетной температуры на модуль упругости ферритного чугуна с шаровидным графитом

Расчетная температура, °С	20	100	150	200	250	300
Модуль упругости E, 10^3 МПа	169	167	165	163	161	159
Коэффициент Пуассона ν	0,275 0	0,278 0	0,279 5	0,281 0	0,282 5	0,284 0

А.2.2 Аустенитный чугун с шаровидным графитом в соответствии с EN 13835:2002

Таблица А.2.2-1 – Технические характеристики аустенитного чугуна с шаровидным графитом

Обозначение материала		0,2%-ный условный предел текучести $R_{p0,2}$, МПа	Модуль упругости E, 10^3 МПа	Коэффициент Пуассона ν	Плотность, кг/дм^3
Символ	Номер				
EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	210	130	0,17	7,45
EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	170	100	0,17	7,40
EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	210	145	0,17	7,30

Таблица А.2.2-2 – Влияние расчетной температуры на модуль упругости аустенитного чугуна с шаровидным графитом

Расчетная температура, °С	Модуль упругости E, 10^3 МПа		
	EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-GJSA-XNi22	EN-GJSA-XNiMn13-7
20	130	100	145
100	128	98	143
150	127	97	141
200	125	96	140
250	124	95	138
300	123	94	137
350	н/п	93	н/п
400	н/п	92	н/п
450	н/п	91	н/п
500	н/п	90	н/п
540	н/п	89	н/п

Приложение B
(справочное)

Пластичность

Использование пластичного материала, такого как ферритный или аустенитный чугун с шаровидным графитом, для применения при растягивающих нагрузках требует нагрузочной оценки характеристик прочности и ударной вязкости в зависимости от рабочей температуры и скорости приложения нагрузки с целью обеспечения надежности против хрупкого разрушения во всех условиях эксплуатации.

Среди прочего, критерии оценки для проектирования основаны на расчете прочности и установлении номинального напряжения. Необходимо гарантировать отсутствие хрупкого разрушения не только для динамически нагруженных элементов. В условиях, способствующих хрупкому разрушению, имеется вероятность того, что разрушение начнется при напряжении элемента, меньшем предела текучести, и затем приведет к разрушению из-за неустойчивого распространения трещины. Только при достаточной и известной ударной вязкости или пластичности материал может обеспечить выполнение требования утечки до разрушения к элементу.

Испытания на удар образца с надрезом из чугуна с шаровидным графитом – это обычный метод определения надежности против хрупкого разрушения. Энергия удара, ударная вязкость образца с надрезом или энергия удара образца с надрезом соответственно преимущественно используются в качестве меры для определения ударной вязкости или недостаточной хрупкости. Из-за невозможности разделить отдельные механизмы энергии, такие как пластическая деформация, зарождение трещины и распространение трещины, применяют испытание на удар образца с надрезом с использованием измерительных приборов или различные методы механики разрушения. Последнее, в частности, подходит для более крупных элементов.

Для концепции механики разрушения размер трещины и напряжение элемента количественно связаны с характеристикой материала, который, таким образом, является мерой сопротивления распространению трещины. Целью является определение критического размера трещины или напряжения, приводящего к неустойчивому пути трещины и внезапному разрушению элемента.

Механика линейно-упругого разрушения позволяет количественно определить разрушение элементов с трещинами в результате неустойчивого распространения трещины при статическом нагружении или устойчивого распространения трещины при циклическом нагружении. Эта определенная вязкость разрушения KIC определяет сопротивление материала неустойчивому распространению трещины, приводящему к хрупкому разрушению. Для вязких материалов эта концепция применима только при низких температурах или при наличии эффектов охрупчивания, например из-за микроструктуры или большой толщины стенки.

Общая механика пластического разрушения используется, если перед вершиной трещины имеет место пластическая деформация удлинения, т. е. упругопластическое поведение материала. Определение может выполняться прежде всего посредством концепции CTOD (раскрытие в вершине трещины), при которой механизм разрушения контролируется критической деформацией в вершине трещины.

При J-интегральной концепции определяют линейный интеграл вокруг вершины трещины. Аналогично предыдущей концепции получают характеристику материала, которая определяет сопротивление зарождению трещин.

Ввиду вышеупомянутых замечаний понятно, что само по себе определение энергии удара с надрезом в ферритном чугуне с шаровидным графитом никоим образом не представляется достаточной мерой для сравнения его ударной вязкости или пластичности со сталью. Причиной тому является невозможность что-либо утверждать о пластической деформируемости и поведении при растрескивании материала.

Напротив, ферритные чугуны с шаровидным графитом, имеющие энергию удара при испытаниях образца с надрезом от 12 до 20 Дж, обладают характеристиками зарождения трещины, которые соответствуют нелегированным и низколегированным сталям со значительной большей энергией удара образца с надрезом около 50 Дж в верхнем положении. Значения вязкости разрушения ферритного чугуна с шаровидным графитом обусловливают упругопластическое поведение при разрушении даже при температурах –60 °C, т. е. жесткую характеристику разрушения, такую, что значения KIC находятся на уровне нелегированных и низколегированных сталей.

Приложение С
(справочное)

Определение минимальной местной толщины стенки и минимального требуемого давления испытаний на разрыв

Используемые формулы:

$$e_a = e_{act} \cdot \left(\frac{S \cdot PS \cdot R_{m(3)}}{P_{b,act} \cdot R_{p0,2} \cdot C_Q \cdot C_T \cdot C_e} \right)^{1/n}; \quad (C.1)$$

$$e_{min} \geq e_a + c; \quad (C2)$$

$$\frac{R_{p0,2/20}}{R_{p0,2/T}} = \frac{1}{C_T}; \quad (C.3)$$

$$C_T = 1 - 0{,}001(T - 20); \quad (C.4)$$

для ферритных марок

$$PS \leq P_{b,act} \cdot \frac{f}{R_{m(3)}} \left(\frac{e_{min} - c}{e_{act}} \right)^n. \quad (C.5)$$

Таблица С-1 – Данные

Проектные данные	**Вычисленные данные**	**Измеренные данные**
PS = 8 бар (0,8 МПа) Максимальное рабочее давление	P_d = 1,30 МПа Расчетное давление	$P_{b,act}$ = 13 МПа (130 бар) Фактическое давление разрыва
e_{min} = 7 мм Минимальная толщина на чертеже	e_a = 3,69 мм Расчетная толщина	e_{act} = 8 мм Фактическая измеренная толщина у разорванной стенки
c = 1 мм	f = 60 МПа, номинальное расчетное напряжение	
T = 120 °С	C_T = 0,9 Температурный коэффициент	
S = 3		
C_Q = 0,8		
n = 1 (искривленная область)		
Расчетные характеристики приложения А		**Измеренные характеристики материала**
$R_{p0,2}$ = 250 МПа		$R_{p0,2}$ = 280 МПа Фактический условный предел текучести
Для EN-GJS-400-18		$R_{m(3)}$ = 450 МПа Средняя фактическая прочность на разрыв по трем образцам для испытаний

Заключение

P_d расчетное давление = 1,3 МПа > PS: удовлетворительно.

e_{act} = 8,0 мм > e_{min} = 7,0 мм > e_a + c = 3,69 + 1 = 4,69 мм; толщина стенки удовлетворяет максимальным рабочим условиям (PS = 8 бар или 0,8 МПа).

Приложение D
(обязательное)

Оценка усталостной долговечности

D.1 Назначение

D.1.1 Настоящее приложение устанавливает требования к упрощенной и/или подробной оценке усталостной долговечности оборудования, работающего под давлением, под действием колебаний давления, дополнительного напряжения от изменений температуры при рабочих условиях или дополнительных индуцированных напряжений вследствие внешних усилий в критических зонах (определение критической зоны см. в 3.1.1). Оборудование, работающее под давлением, из чугунов с шаровидным графитом должно проектироваться и изготавливаться в соответствии с настоящим европейским стандартом, и должны использоваться марки материала согласно таблицам 5.1-1 и 5.1-2.

D.1.2 Правила упрощенной оценки могут применяться только в случае колебаний внутреннего давления. Подробная оценка относится к колебаниям давления и возможным другим циклическим нагрузкам, таким как дополнительное напряжение из-за быстрых перепадов температур в рабочих условиях или дополнительные индуцированные напряжения вследствие внешних усилий в критических зонах (определение критической зоны см. в 3.1.1).

Примечание – Правила упрощенной оценки основаны на консервативных допущениях. Более точные, менее консервативные результаты могут быть получены при использовании правил подробной оценки.

D.1.3 Предполагается, что сосуд был спроектирован в соответствии со всеми требованиями EN 13445-6. Настоящее приложение применяется только при невыполнении условий эксплуатации для случая статической нагрузки (см. раздел 4, таблица 4.1-1).

D.1.4 Усталостные трещины могут распространяться от поверхностных дефектов, расположенных на стороне, противоположной нагрузке давления. Критерии приемки для этих дефектов приведены в 7.1. Свидетельством возможного разрушения под воздействием циклических нагрузок является возникновение поверхностных усталостных трещин, которые можно обнаружить с использованием соответствующего метода неразрушающего контроля и характер которых можно оценить оптическим исследованием.

D.2 Специальные определения

См. EN 13445-3:2009 и раздел 3.

D.3 Специальные символы и сокращения

Следующие символы и сокращения используются в дополнение к приведенным в 3.3 и в EN 13445-3:2009 (раздел 4, п. 17.3 и 18.3).

C_C – коэффициент в формуле расчетной кривой усталости для элементов из чугуна с шаровидным графитом;

m_C – экспонента в формуле расчетной кривой усталости для элементов из чугуна с шаровидным графитом;

e_{max} – максимальная местная толщина элемента в месте возможного образования усталостной трещины, мм.

D.4 Ограничения

D.4.1 Данные правила применяются к элементам, спроектированным с использованием:

a) формул;

b) расчета методом конечных элементов.

D.4.2 Данные правила применяются только к элементам, эксплуатирующимся вне диапазона ползучести (т. е. если номинальное расчетное напряжение зависит от времени).

D.4.3 Данные, на которых основываются данные правила, действительны для усталости в некорозионной среде. Предполагается, что в случае коррозионных условий принимаются меры предосторожности, т. е. припуск на коррозию и/или защита поверхности.

D.5 Общие положения

D.5.1 ΔP получают с применением упрощенного метода расчета циклов, описанного в EN 13445-3:2009 (п. 18.9.2), или метода расчета циклов для резервуаров в EN 13445-3:2009 (п. 18.9.3).

D.5.2 Расчеты в соответствии с D.6 или D.7 выполняются для различных элементов сосуда. Определение напряжения в отливках основано на расчете напряжений деталей с надрезом. Наименьшая долговечность, полученная для каждого элемента, представляет собой усталостную долговечность сосуда.

D.5.3 Любой радиус надреза должен быть равен не менее 1,5 минимальной толщины прилегающей стенки, чтобы снизить коэффициент местных напряжений. Во избежание резких переходов толщины сечения необходимо предусмотреть величину сужения 1 : 3, как указано в 5.2.2.6.

D.6 Упрощенная оценка усталости

D.6.1 Диапазон псевдо-упругих напряжений

Упрощенная оценка основана на определении приведенного диапазона псевдоупругих напряжений $\Delta\sigma^*$ в сочетании с расчетными кривыми усталости, как определено в D.6.3.

$$\Delta y^* = \frac{\Delta P \cdot 3 \cdot f}{P_{max} \cdot f_e \cdot f_{T^*}}. \qquad \text{(D.6.1)}$$

Для упрощения максимально допустимое давление элемента (P_{max}) можно принять равным максимально допустимому давлению PS всего сосуда или вычислительному давлению P.

Примечание 1 – Эти упрощения ведут к более консервативным результатам.

Примечание 2 – Поскольку f и P_{max} (D.6.1) приняты при вычислительной температуре, температуру, при которой происходят циклы, учитывать не требуется.

Примечание 3 – P_{max} можно рассчитать в соответствии с EN 13445-3:2009. Если невозможно произвести расчет методом проектирования с использованием формул для основных частей, находящихся под давлением, можно принять экспериментальное значение согласно настоящему европейскому стандарту.

Значение коэффициента напряжений η для каждого элемента получают из таблицы D.1A настоящей части.

Для деталей, не указанных в таблице D.1A, используется значение для $\eta = 3$, если использование более низкого значения не может быть обосновано, например, трехмерным расчетом напряжений методом конечных элементов, экспериментальным анализом и т. п.

Примечание 4 – Более не требуется использовать таблицу 17-1 из EN 13445-3:2009, подставляя коэффициент сварного соединения $z = 1$.

Поправочные коэффициенты f_e и f_{T^*} определяют, как указано в D.6.2.

Поправочный коэффициент чистоты поверхности и среднего уровня напряжений не требуется, поскольку этот коэффициент уже учтен в расчетных кривых усталости D.6.3. Фактическое состояние поверхности должно отвечать требованиям 7.1.

D.6.2 Поправочные коэффициенты

D.6.2.1 Поправка на толщину стенки

$$f_e = \left(\frac{25}{e_{max}}\right)^{0,182}, \qquad \text{(D.6.2)}$$

$f_e = 1$ при $e_{max} \le 25$ мм (D.6.3).

При $e_{max} > 150$ мм применяется значение f_e при $e_{max} = 150$ мм.

D.6.2.2 Поправка на температуру

Поправочный коэффициент температуры f_{T^*} получают следующим образом:

– для ферритных материалов:

$$f_T = 1{,}03 - 1{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot T^* - 1{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{*2}; \qquad \text{(D.6.4)}$$

– для аустенитных материалов:

$$f_T = 1{,}043 - 4{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot T^*, \quad \text{(D.6.5)}$$

где средняя температура цикла составляет:

$$T^* = 0{,}75 \cdot T_{max} + 0{,}25 \cdot T_{min}, \quad \text{(D.6.6)}$$

$f_{T^*} = 1$ при температурах $T^* < 100$ °C. (D.6.7)

D.6.3 Расчетные кривые усталости

Расчетные кривые усталости, приведенные на рисунке D.1, описываются следующей формулой:

$$\Delta y_R = \frac{C_Q}{0{,}9} \cdot \frac{C_C}{N^{1/m_C}}, \quad \text{(D.6.8)}$$

где C_C и m_C – константы, значения которых приведены в таблице D.1.

Для нагружения с постоянной амплитудой предел выносливости $\Delta\sigma_D$ (т. е. диапазон напряжений, ниже которого усталостную долговечность можно принять равной бесконечности) соответствует диапазону напряжений $\Delta\sigma_R$ при 2×10^6 циклов.

Штриховые линии на рисунке D.1 относятся только к расчетам накопленных повреждений (формула D.8.1) при нагружении с переменной амплитудой, что включает диапазоны напряжений более $\Delta\sigma_D$. Кривые оканчиваются при $N = 10^8$ циклов. Соответствующий диапазон напряжений является границей среза $\Delta\sigma_{Cut}$. Соответствующие значения $\Delta\sigma_{Cut}$ см. в таблице D.1. Предполагается, что воображаемые диапазоны напряжений ниже этой границы $\Delta\sigma_{Cut}$ не способны вызвать усталостные повреждения оборудования, работающего под давлением.

Таблица D.1 – Коэффициенты расчетных кривых усталости для марок чугуна с шаровидным графитом – упрощенная оценка

Материал	Константы кривой $\Delta\sigma_R - N$ [a]				Допустимый диапазон напряжений при N циклах, МПа			
	$10^3 < N < 2 \times 10^6$		$2 \times 10^6 < N < 10^8$		$C_Q = 0{,}9$		$C_Q = 0{,}8$	
	$1/m_C$	C_C	$1/m_C$	C_C	$\Delta\sigma_D$ при 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ при 10^8	$\Delta\sigma_D$ при 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ при 10^8
EN-GJS-400-18	0,116	786	0,1	623	146	99	130	88
EN-GJS-350-22	0,116	731	0,1	579	136	92	121	81
EN-GJSA-XNiMn23-4	0,116	714	0,1	566	133	89	118	79
EN-GJSA-XNi22	0,116	642	0,1	507	119	80	106	71
EN-GJSA-XNiMn13-7	0,116	714	0,1	566	133	89	118	79

[a] Для E в соответствии с таблицами A.2.1-1 и A.2.2-1.

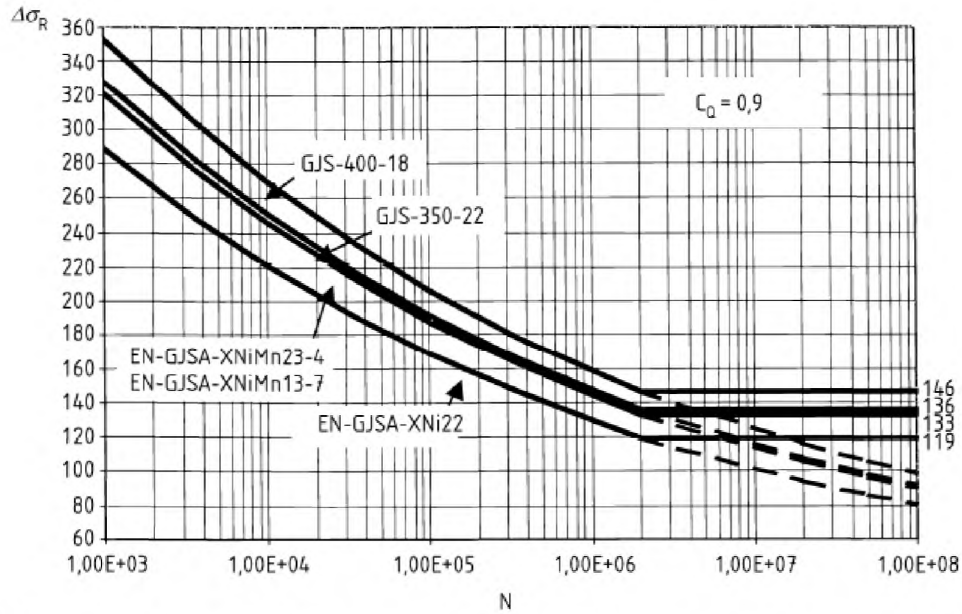


Рисунок D.1 – Расчетные кривые усталости для ферритных и аустенитных марок чугуна с шаровидным графитом при температуре окружающей среды – упрощенная оценка

Примечание 1 – Данные расчетные кривые усталости были получены из кривых, приведенных в D.7 для подробной оценки (рисунок D.2). Они учитывают эффект надреза всех местных концентраций напряжений, для которых коэффициент K_T не превышает приблизительно 2. Вместо 2 можно использовать более точное значение 1,88. Это значение представляет собой отношение предела выносливости расчетных кривых на рисунке D.2 к пределу выносливости кривых на рисунке D.1. Определение теоретического коэффициента напряжений K_T см. в D.7.1, формула D.7.3. Они действительны для той же вероятности безотказной работы, т. е. Ps > 97,7 %.

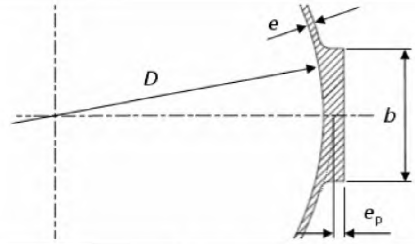
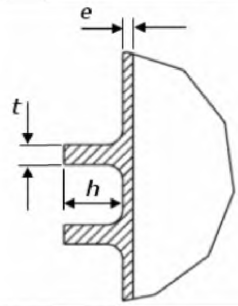
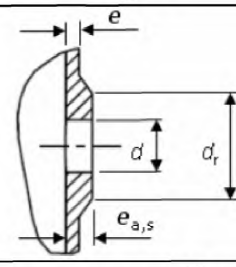
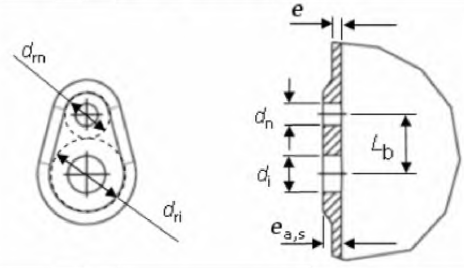
Значение η для каждой детали сосуда получают из таблицы D.1A. Оно представляет собой верхнюю границу следующего отношения:

$$\eta = \frac{\text{максимальное напряжение конструкции детали } P_{max}}{\text{номинальное расчетное напряжение при вычислительной температуре}}.$$

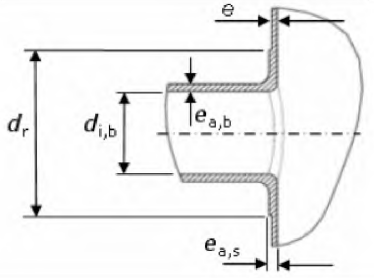
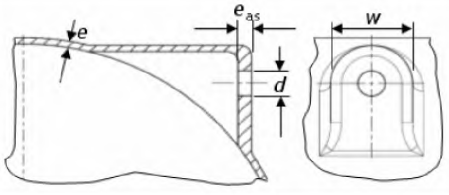
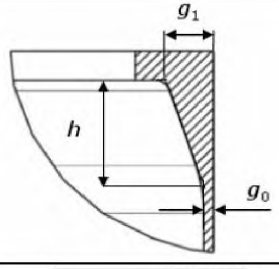
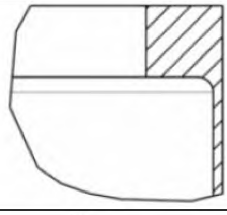
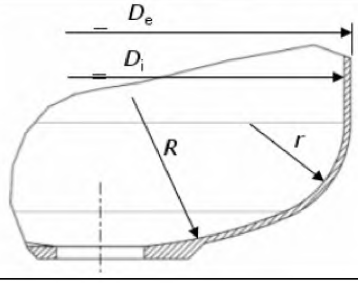
Для оценки усталостной долговечности детали, не представленной в таблице D.1A, значение η получают посредством оценки максимального напряжения конструкции в детали под давлением P_{max}. С целью упрощения можно принять, что к любой детали применяется максимальное значение η для всего сосуда.

Примечание 2 – Эти значения равным образом применяются к любой литой детали из металлического материала (литейная сталь, литейный алюминий и т. д.), поскольку это не зависит от материала.

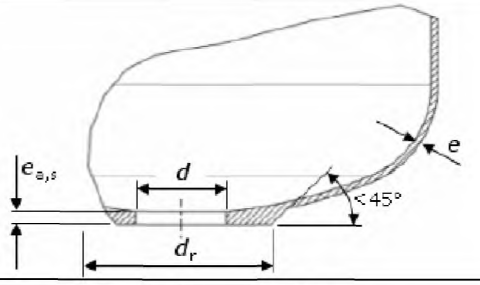
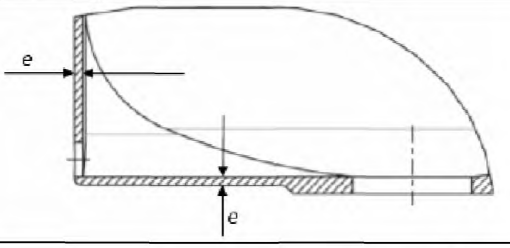
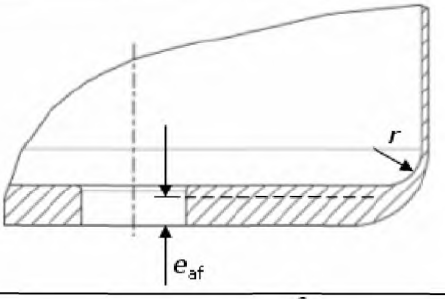
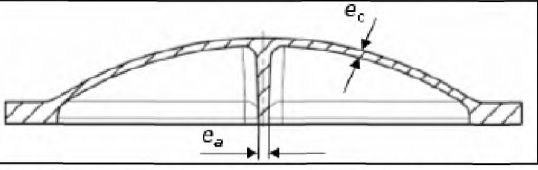
Таблица D.1A – Коэффициент напряжений η и связанное с ним максимальное давление для типичных литых конструкций

Описание детали	Деталь	Максимально допустимое давление P_{max}	Условия	Коэффициент напряжений η
Цилиндрические или конические оболочки	Намеренно оставлено незаполненным	Цилиндрическая оболочка: EN 13445-3:2009, формула (7.4.3) Коническая оболочка: EN 13445-3:2009, формула (7.6.4)		1,0
Прилив для паспортной таблички на цилиндрической или конической оболочке		Как для деталей оболочек	$b \le 0{,}4 \cdot D$ $e_p \le 2 \cdot e$	1,1
Кольцо жесткости (однорядное или многорядное) на цилиндрической или конической оболочке		Как для деталей оболочек	$2 \cdot e \le t \le 4 \cdot e$ $2 \cdot e \le h \le 6 \cdot e$	1,0
Одно отверстие с усилением в оболочке или сферическом днище		Как для деталей оболочек	$e_{a,s} \ge 2 \cdot e$ $d_r \ge 2 \cdot d$	3,0
Несколько отверстий с усилением в оболочке или сферическом днище		Как для деталей оболочек	$e_{a,s} \ge 2 \cdot e$ $d_{r,i} \ge 2 \cdot d_r$ $d_{r,n} \ge 2 \cdot d_r$ $L_b \ge d_i + d_n$	3,0

Продолжение таблицы D.1A

Описание детали	Деталь	Максимально допустимое давление P_{max}	Условия	Коэффициент напряжений η
Штуцер с усилением в оболочке или сферическом днище		Как для деталей оболочек	$e_{a,s} \geq 1{,}5 \cdot e$ $e_{a,b} \geq 1{,}5 \cdot e$ $d_r \geq 2 \cdot d_{i,b}$ $d_{i,b}/D_i^e <$ 0,6	2,0
Штуцер без усиления в оболочке или сферическом днище			$e_{a,s} = e$ $e_{a,b} = e$ $d_{i,b}/D_i^e <$ 0,6	3,0
Тангенциальный вход/выход в цилиндрической или конической оболочке		Как для деталей оболочек	$e_{a,s} \geq 2 \cdot e$ $3 \cdot d \leq w \leq 5 \cdot d$	2,5
Фланец со ступицей		См. EN 13445-3:2009, раздел 11 или приложение G [a]	$g_1 \geq 4 \cdot g_0$ $h \geq 3 \cdot (g_1 - g_0)$	1,5
			$4 \cdot g_0 \geq g_1 \geq 2 \cdot g_0$ $h \geq (g_1 - g_0)$	2,0
Фланец без ступицы		См. EN 13445-3:2009, раздел 11 или приложение G [a]	$g_1 = g_o$ $h = 0$	2,0
Область изгиба торосферического днища		См. EN 13445-3:2009, формула (7.5-7) [b]	$R/D_e \leq 0{,}8$ $r/D_i \geq 0{,}15$	2,0
			Другие параметры в соответствии с EN 13445-3:2009 (п. 7.5.3.1)	2,50

Окончание таблицы D.1A

Описание детали	Деталь	Максимально допустимое давление P_{max}	Условия	Коэффициент напряжений η
Усиленное отверстие в торосферическом днище		Как для детали торосферического днища	$e_{a,s} \geq 2 \cdot e$ $d_r \geq 2 \cdot d$	2,0
Отверстие для слива в торосферическом днище		Как для детали торосферического днища		3,0
Область изгиба плоского днища		См. EN 13445-3:2009, раздел 10 [c]	$r \geq 1{,}3 \cdot e_{af}$ [d]	1,5
			$1{,}3 \cdot e_{af} > r \geq e_{af}$	3,0
Отверстие в плоском днище			См. EN 13445-3:2009, (п. 10.6.1)	2,0
Перегородка в выпуклой крышке		Как для детали крышки, см. приложение G	$e_a \geq e_c$	1,1

Примечание – e_{af} – это расчетная толщина плоского днища, вычисленная без отверстия (см. EN 13445-3:2009, п. 10.4.3).

[a] Максимальное вычислительное давление в явном виде не приведено в EN 13445-3:2009 (раздел 11). Оно должно быть вычислено как давление, которое дает напряжения до их допустимых пределов, или в EN 13445-3:2009 (приложение G) коэффициент нагрузки, равный 1,0. Для консервативного упрощения можно принять P_{max} в качестве $P_{расч}$.

[b] Для использования в рамках настоящего раздела P_{max} принимается равным P_y, которое получают по формуле 7.5-7 в EN 13445-3:2009. Другие возможные величины P_s и P_b (которые вычисляются по формулам 7.5-6 и 7.5-8 соответственно) здесь не рассматриваются.

[c] Максимальное вычислительное давление – это давление для плоского днища (а не давление прилегающей цилиндрической оболочки). В формуле D.6-1 в качестве значения f подставляется наименьшее из значений для днища и для оболочки.

[d] Поскольку в EN 13445-3:2009 (раздел 10) не приводится явной формулы для P_{max}, то P_{max} вычисляют в виде давления, которое дает требуемую толщину днища, равную расчетной толщине. Для консервативного упрощения можно принять P_{max} в качестве $P_{расч}$.

[e] D_i – внутренний диаметр сосуда.

D.6.4 Допустимое количество циклов

Чтобы получить допустимое количество циклов нагрузки N при заданном диапазоне напряжений $\Delta\sigma^*$, вычисляют значение следующего выражения:

$$N = \left(\frac{C_Q}{0{,}9} \cdot \frac{C_C}{\Delta y^*} \right)^m . \qquad \text{(D.6.9)}$$

Значение для $\Delta\sigma^*$ вычисляют по формуле (D.6.1).

D.6.5 Допустимый диапазон напряжений $\Delta\sigma$

В качестве альтернативы для получения допустимого диапазона напряжений $\Delta\sigma$ для заданного количества приложенных циклов нагрузки N:

$$\Delta y \le \Delta y_R \cdot f_e \cdot f_{T^*}, \qquad \text{(D.6.10)}$$

где

$$\Delta y_R = \frac{C_Q}{0{,}9} \cdot \frac{C_C}{N^{1/m_c}}, \qquad \text{(D.6.11)}$$

f_e и f_{T^*} вычисляют в соответствии с D.6.2.

D.7 Подробная оценка усталости

D.7.1 Диапазоны псевдоупругих напряжений

В соответствии с методом, описанным в EN 13445-3:2009 (раздел 18) для несварных элементов, значения диапазона максимального эквивалентного напряжения $\Delta\sigma_{экв}$ и диапазон напряжений конструкции $\Delta\sigma_{экв,констр}$ определяют с использованием подробного метода численного расчета. Из этих значений можно получить диапазон приведенного эквивалентного диапазона с надрезом $\Delta\sigma^*$ с использованием $K_{эф}$:

$$\Delta y^* = K_{эф} \cdot \frac{\Delta y_{экв,констр}}{f_s \cdot f_e \cdot f_T \cdot f_m}, \qquad \text{(D.7.1)}$$

где

$$K_{эф} = 1 + \frac{1{,}5 \cdot (K_T - 1)}{1 + 0{,}5 \cdot MAX\left\{1; K_T \cdot \dfrac{\Delta y_{экв,констр}}{\Delta y_D}\right\}} \le K_T, \qquad \text{(D.7.2)}$$

$$K_T = \frac{\Delta y_{экв}}{\Delta y_{экв,констр}}, \qquad \text{(D.7.3)}$$

где $\Delta\sigma_D$ – предел выносливости при $N \ge 2 \times 10^6$ циклов из таблицы D.2.

Консервативно можно предположить, что $K_{эф} = K_T$. Поправочные коэффициенты f_s, f_e, f_{T^*} и f_m определяют как указано в D.7.2.

D.7.2 Поправки к диапазону напряжений

D.7.2.1 Поправка на толщину стенки

$$f_e = F_e^{(0{,}1 \ln N - 0{,}465)}, \qquad \text{(D.7.4)}$$

где

$$F_e = \left(\frac{25}{e_{max}} \right)^{0{,}182}, \qquad \text{(D.7.5)}$$

где $f_e = 1$ при $e_{max} \le 25$ мм.

При $e_{max} > 150$ мм применяется значение f_e для $e_{max} = 150$ мм.

D.7.2.2 Поправка на температуру

Поправочный коэффициент температуры f_T, приведен в D.6.2.2.

D.7.2.3 Поправочный коэффициент чистоты поверхности

Для поддержания низкого местного напряжения предпочтительна более тонкая чистовая обработка поверхности благодаря соответствующим технологиям литья на стороне, противоположной изменяющемуся давлению.

$$f_s = F_s^{(0,1\ln N - 0,465)}, \quad \text{(D.7.6)}$$

где

$$F_s = 1 - 0,03 \cdot \ln(R_z) \cdot \ln\left(\frac{R_m}{200}\right), \quad \text{(D.7.7)}$$

$f_s = F_s$, если $N > 2 \cdot 10^6$,

где R_z – высота неровностей, мкм (принять $R_z = 200$, если не указано).

D.7.2.4 Поправка на среднее напряжение

Поправочный коэффициент среднего напряжения f_m определяется из EN 13445-3:2009 (п. 18.11.1.3). Однако коэффициент чувствительности среднего напряжения M для марок чугуна с шаровидным графитом в соответствии с настоящим европейским стандартом составляет:

$$M = 0,00035 \cdot R_m + 0,08. \quad \text{(D.7.8)}$$

D.7.2.5 Поправочные коэффициенты пластичности

Поправочные коэффициенты для механических k_e и термических k_u нагрузок в диапазоне гиперпластичности можно не учитывать вследствие высоких коэффициентов надежности по 0,2%-ному условному пределу текучести, используемых при вычислении номинального расчетного напряжения в EN 13445-6:2009, а также вследствие того, что напряжения конструкции никогда не превышают 3f.

D.7.3 Расчетные кривые усталости

Расчетные кривые усталости, приведенные на рисунке D.2, описываются следующей формулой:

$$\Delta y_R = \frac{C_Q}{0,9} \cdot \frac{C_C}{N^{1/m}}, \quad \text{(D.7.9)}$$

где C_C и m_C – константы, значения которых приведены в таблице D.2.

Таблица D.2 – Коэффициенты расчетных кривых усталости для марок чугуна с шаровидным графитом – подробная оценка

Материал	Константы кривой $\Delta\sigma_R - N$ [a]				Допустимый диапазон напряжений при N циклах, МПа			
	$10^3 < N < 2 \times 10^6$		$2 \times 10^6 < N < 10^8$		$C_Q = 0,9$		$C_Q = 0,8$	
	$1/m_C$	C_C	$1/m_C$	C_C	$\Delta\sigma_D$ при 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ при 10^8	$\Delta\sigma_D$ при 2×10^6	$\Delta\sigma_{cut}$ при 10^8
EN-GJS-400-18	0,10	1 173	0,10	1 173	275	186	244	165
EN-GJS-350-22	0,10	1 091	0,10	1 091	256	173	227	154
EN-GJSA-XNiMn23-4	0,10	1 065	0,10	1 065	249	168	222	150
EN-GJSA-XNi22	0,10	957	0,10	957	224	151	199	135
EN–GJSA-XNiMn13-7	0,10	1 065	0,10	1 065	249	168	222	150

[a] Для E в соответствии с таблицами A.1 и A.3.

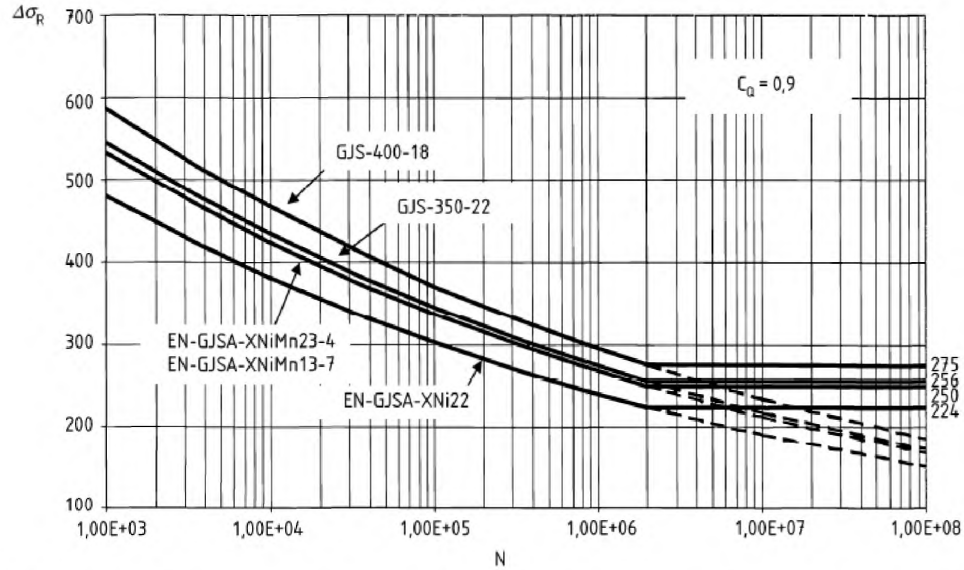


Рисунок D.2 – Расчетные кривые усталости для ферритных и аустенитных марок чугуна с шаровидным графитом при температуре окружающей среды – подробная оценка

Примечание – Расчетные кривые усталости на рисунке D.2 были выведены из данных (см. [1]), полученных при испытаниях на усталость при осевой и изгибающей нагрузке образцов марки чугуна с шаровидным графитом EN-GJS-400-18 без надреза, проводившихся при контроле нагрузки, или для приложенных деформаций, превышающих предел текучести (малоцикловая усталость), при контроле деформаций. Допустимые напряжения были получены из средних результатов посредством применения коэффициентов надежности 5 на усталостную долговечность и 1,3 на диапазон напряжений. Полученные в результате расчетные кривые предполагают вероятность безотказной работы P_s не менее 97,7 %.

Штриховые линии на рисунке D.2 относятся только к расчетам накопленных повреждений (формула D.8.1) при нагружении с переменной амплитудой, что включает диапазоны напряжений более $\Delta\sigma_D$. Кривые оканчиваются при $N = 10^8$ циклов. Соответствующий диапазон напряжений является границей среза $\Delta\sigma_{Cut}$. Соответствующие значения $\Delta\sigma_{Cut}$ см. в таблице D.2. Предполагается, что диапазоны напряжений ниже этой границы $\Delta\sigma_{Cut}$ не способны вызвать усталостные повреждения оборудования, работающего под давлением.

D.7.4 Допустимое количество циклов

Чтобы получить допустимое количество циклов нагрузки N при заданном диапазоне напряжений $\Delta\sigma^*$, вычисляют значение следующего выражения:

$$N = \left(\frac{C_Q}{0{,}9} \cdot \frac{C_C}{\Delta y^*} \right)^m . \qquad \text{(D.7.10)}$$

Значение для $\Delta\sigma^*$ вычисляют по формуле (D.7.1).

D.7.5 Допустимый диапазон напряжений

В качестве альтернативы для получения допустимого диапазона напряжений $\Delta\sigma_{экв,конст}$ для заданного количества приложенных циклов нагрузки N:

$$\Delta y_{экв,констр} \le \Delta y_R \cdot f_e \cdot f_s \cdot f_m \cdot f_{T^*} / K_{эф}, \qquad \text{(D.7.11)}$$

где f_s, f_e, f_m и f_{T^*} вычисляют в соответствии с D.7.2. $K_{эф}$ вычисляется по формуле (D.7.2) или принимается равным K_T.

D.8 Правило оценки на общее усталостное повреждение

Индекс общего усталостного повреждения вследствие кумулятивного эффекта циклов нагружения с переменной амплитудой, составляющего заданный спектр диапазонов расчетных напряжений, вычисляется следующим образом:

$$D = \sum_{i}^{k} \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \ldots, \qquad \text{(D.8.1)}$$

где n_i – количество циклов каждого диапазона напряжений $(\Delta\sigma^*)_i$, приложенного в течение расчетного срока службы сосуда, а N_i – допустимое количество циклов, соответствующее этому диапазону напряжений, полученное в соответствии с D.6.4 или D.7.4 из соответствующей расчетной кривой усталости.

Конструкция является приемлемой, если соблюдается следующее условие:

$$D \leq 1. \qquad \text{(D.8.2)}$$

Если $D > 1$, условие не соблюдается и конструкцию необходимо изменить.

D.9 Устранение поверхностных дефектов

Если возникает недопустимый поверхностный дефект, который не отвечает требованиям 7.1, устранение возможно только посредством зачистки. Минимальная фактическая требуемая толщина вычисляется в соответствии с настоящим приложением, учитывая все разделы настоящего европейского стандарта касательно требований к проектированию. Сварка не допускается, как было указано в 5.3.2.

Приложение E
(обязательное)

Проектирование путем расчетов для отливок

E.1 Введение

Для сосудов, работающих под давлением, из чугуна общие процедуры и соответствующие правила, рассматриваемые в:

– приложении B «Проектирование путем расчетов – прямой способ»;

– приложении C «Проектирование путем расчетов – метод, основанный на категориях напряжений» EN 13445-3:2009, необходимо изменить следующим образом:

E.2 Особые требования к EN 13445-3:2009, приложение B

E.2.1 Дополнение к B.8.2.3: проектные проверки для сочетаний нагрузок при нормальной эксплуатации

Параметры прочности материала (*RM*) и частные коэффициенты надежности (γ_R) должны иметь значения, приведенные в следующей таблице:

Таблица E.1 – *RM* и γ_R для сочетаний нагрузок при нормальной эксплуатации

Материал	*RM*	γ_R
Чугун с шаровидным графитом [a]	$R_{p0,2/T}$	$1,67/(C_Q \cdot C_e)$
[a] Допустимые марки материала см. в таблицах 5.1-1 и 5.1-2.		

E.2.2 Дополнение к B.8.2.4: проектные проверки для сочетаний нагрузок при испытаниях

RM и γ_R должны иметь значения, приведенные в следующей таблице:

Таблица E.2 – *RM* и γ_R для сочетаний нагрузок при испытаниях

Материал	*RM*	γ_R
Чугун с шаровидным графитом [a]	$R_{p0,2/T_{исп}}$	$1,33/C_e$
[a] Допустимые марки материала см. в таблицах 5.1-1 и 5.1-2.		

E.3 Дополнения к EN 13445-3:2009, приложение C

В C.7 используется символ «*f*». Критерии оценки определены в 5.2.2.2.

E.4 Требования

Проектирование путем аналитических расчетов должно заключать в себе следующее:

– подробное описание используемого численного метода, в том числе название и версию программного обеспечения, если оно используется;

– описание геометрии модели (в том числе тип элемента для конечно-элементного анализа);

– условия нагружения и граничные условия, используемые для представления сочетаний нагрузок в технических условиях пользователя на проектирование;

– характеристики используемого материала для всех требуемых физических свойств (т. е. модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент теплового расширения, теплопроводность, температуропроводность), параметров прочности (т. е. предел текучести и предел прочности при растяжении), а также расчетная интенсивность мембранных напряжений;

– описание того, используется ли нелинейность материала при анализе, в том числе описание модели материала (т. е. кривая «напряжение – деформация» и кривая «циклическое напряжение – деформация»);

– описание процедуры численного расчета (т. е. статический расчет, расчет устойчивости, расчет собственных частот, динамический расчет) и указание того, применяется ли геометрически линейный или нелинейный вариант;

– графическое отображение значимых результатов (т. е. численная модель, деформированные изображения и контурные изображения полученных температур и напряжений);

– используемый метод проверки численной модели (т. е. анализ чувствительности сетки и проверка равновесия для конечно-элементного расчета, например проверка окружного напряжения в элементе, расположенном далеко от неоднородности конструкции, и проверка достижения общего равновесия между приложенными нагрузками и реакциями при заданных граничных условиях);

– описание процедуры обработки результатов численного расчета с целью получения окончательных результатов (т. е. метод линеаризации напряжений, использование центральных или узловых значений полученного напряжения, деформации и температуры);

– итоговые результаты численного расчета с указанием критериев приемки, используемых для обеспечения соответствия требованиям настоящего европейского стандарта;

– электронное хранение результатов расчета, в том числе файлов исходных и выходных данных, содержащих результаты численного расчета, используемых для демонстрации соответствия нормативам.

Приложение F
(справочное)

Рекомендации по проверкам и контролю в процессе эксплуатации

F.1 Назначение

В настоящем приложении даются рекомендации по непрерывной приемке литого оборудования, изготовленного в соответствии с настоящим европейским стандартом.

Инструкции по применению, составленные изготовителем, могут содержать требования к контролю в процессе эксплуатации, а также рекомендации по повторному контролю в зависимости от конструкции, обслуживания и требуемого срока службы.

F.2 Контроль в процессе эксплуатации

Необходимо проводить внешний и при необходимости внутренний контроль (неразрушающими методами) каждого сосуда или части сосуда, работающего под давлением, в срок не позднее рассчитанной допустимой усталостной долговечности в соответствии с приложением D. Если изготовитель считает усталостную долговечность при нормальных условиях эксплуатации равной бесконечности, контроль выполняют после 10 лет эксплуатации, если изготовитель не получил от эксплуатирующего или контролирующего лица информацию о неблагоприятной ситуации.

Примечание 1 – Это время соответствует допустимому количеству циклов, если спектр диапазона расчетных напряжений включает в себя только один тип цикла. Для более сложных спектров нагружения оно соответствует времени достижения индексом общего усталостного повреждения значения 0,5 (см. определение в приложении D).

Эксплуатирующее лицо должно регистрировать количество циклов нагрузки в процессе работы соответствующим образом и при необходимости организовать мероприятия по внутреннему или внешнему контролю.

Примечание 2 – Учетные записи могут указывать на необходимость более короткого интервала контроля, чем первоначально установлено. Если учетные записи отсутствуют, контролер может выбрать самое неблагоприятное из возможных условий в процессе эксплуатации сосуда или его части.

Примечание 3 – В результате вычислений в соответствии с приложением D при подробной оценке усталостной долговечности могут быть получены более продолжительные интервалы контроля, чем на основе метода упрощенной оценки усталости.

Примечание 4 – Ожидаемое повреждение может быть также обнаружено в частях, не находящихся под давлением, таких как пересечения между опорными проушинами и стенкой сосуда, которые могут индуцировать возникновение усталостной трещины и впоследствии уменьшить срок службы части, находящейся под давлением.

Если отсутствуют учетные записи, количество циклов нагрузок может быть оценено в нормальных условиях эксплуатации и согласовано между пользователем и контролером.

Для сосудов, работающих под давлением, подверженных циклическим нагрузкам, контроль в процессе эксплуатации имеет особое значение для заблаговременного обнаружения зарождающегося повреждения. Поэтому внутренний контроль необходимо дополнить неразрушающими испытаниями на высоконапряженных участках, в особенности методами контроля, пригодными для обнаружения поверхностных трещин.

Для мониторинга недоступных областей рекомендуется ультразвуковой контроль с наружной поверхности сосуда.

Если условия эксплуатации сильно отличаются от условий, предполагаемых при вычислении в соответствии с приложением D, в сторону бóльших циклических нагрузок или если повреждение стенки сосуда предполагается до окончания интервалов контроля по причине других эксплуатационных воздействий, то интервалы контроля необходимо сократить.

Напротив, если в ходе регулярного контроля не обнаружены зарождающиеся трещины, то сосуд может эксплуатироваться дальше до следующего контроля в пределах установленного или согласованного интервала, даже если допустимая долговечность, рассчитанная в соответствии с приложением D, уже была достигнута или превышена.

F.3 Меры, принимаемые при достижении рассчитанной допустимой усталостной долговечности

F.3.1 Общие положения

Если допустимая усталостная долговечность для сосуда или элемента, определенная путем вычисления в соответствии с приложением D или путем эксперимента в соответствии с приложением H, демонстрирует бесконечный расчетный или экспериментальный срок службы, то не требуется выполнять неразрушающий контроль, когда сосуд или часть сосуда работали при условиях не выше условий, на которые она рассчитана.

Если достигнута допустимая усталостная долговечность элемента, указанная в инструкции по эксплуатации (т. е. если было достигнуто допустимое количество циклов, отличающееся от бесконечного количества циклов, или если индекс общего усталостного повреждения в соответствии с приложением D достиг значения 1, неразрушающий контроль выполняют по возможности в полном объеме, сосредоточившись на высоконапряженных участках и критических зонах).

Если не обнаружено трещин при неразрушающем контроле, выполненном в интервалах контроля и при вышеупомянутом испытании, может быть допущена дальнейшая эксплуатация.

Если обнаружены трещины, дефекты, подобные трещине, или более значительные повреждения, рассматриваемый компонент или элемент конструкции необходимо заменить, за исключением случаев, когда дальнейшая эксплуатация оказывается допустимой после проверки соответствующими способами.

F.3.2 Испытание сосудов и частей сосудов в конце срока службы без обозначенных повреждений

Когда количество эквивалентных полных циклов давления достигло конца срока службы, необходимо провести испытание давлением, если это признано необходимым для определенных эксплуатационных параметров. Метод испытаний см. в следующем параграфе.

F.3.3 Гидравлические испытания сосудов и частей сосудов с обозначенными повреждениями

Когда количество эквивалентных полных циклов давления достигло конца срока службы, необходимо провести испытание гидравлическим давлением. Время выдержки должно быть по меньшей мере достаточным для проведения полного осмотра с минимальным временем 10 мин независимо от размера детали.

Если испытание проведено успешно, эксплуатация может быть продолжена.

Если обозначенные повреждения видны до достижения количества эквивалентных полных циклов давления, может потребоваться пересмотр конструкции, чтобы выбрать другую марку материала, понизить расчетные параметры либо проверить, были ли рассмотрены все возможные сочетания нагрузок.

Приложение G
(обязательное)

Особые требования к проектированию

G.1 Область применения

В настоящем приложении будут установлены требования к проектировщикам при детальном проектировании литых сфероидальных частей для определения с помощью формул требуемой толщины необычных форм, не включенных в EN 13445-3:2009, но часто используемых в литых конструкциях.

Примечание – Настоящее приложение G содержит только один пример конструкции фланца, но может быть расширено другими деталями конструкции, если они указаны изготовителями и в EN 13445-3:2009 не приведены особые правила DBF. Неправильные формы всегда могут быть проверены методами проектирования DBA, но часто являются более дорогостоящими.

Настоящее правило проектирования применяется к литым выпуклым крышкам без радиуса изгиба, подверженным воздействию давления, для которых выполняются следующие условия.

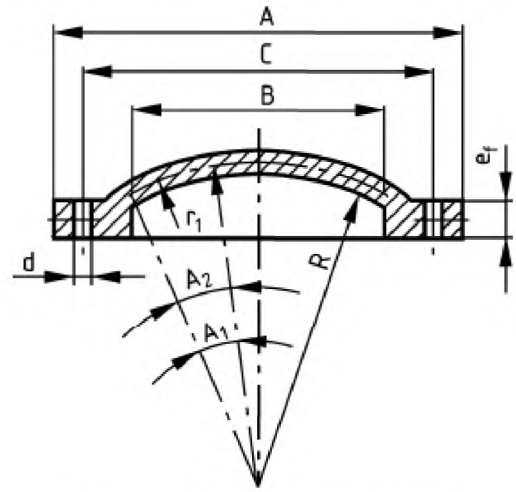


Рисунок G.1 – Литая выпуклая крышка

$$A_1 \geq 20^\circ \text{ и } A_1 \geq 115 \cdot \sqrt{\frac{e_a}{R}},$$

где $R \leq 1\,000$ мм.

Сферическая часть должна находиться выше горизонтальной центральной линии фланца.

G.2 Проектирование

G.2.1 Общие положения

Вычисление номинального расчетного напряжения в соответствии с 5.2.
Нагрузки и площади болтов, вычисление – в соответствии с п. 11.4.3 и 11.5.2 EN 13445-3:2009.

G.2.2 Толщина крышки, давление на выпуклую сторону

$$e_c = 0{,}85 \cdot \frac{PS \cdot R}{f}. \qquad \text{(G.2-1)}$$

G.2.3 Давление на вогнутую сторону

Если давление на вогнутую сторону выше, чем на выпуклую сторону, то толщина верхушки должна составлять не менее

$$e_c = 1{,}65 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{PS \cdot n}{E}}, \qquad \text{(G.2-2)}$$

где n определяется в соответствии со следующей таблицей. Промежуточные значения получают линейной интерполяцией.

Таблица G.1 – Коэффициент формы

e_c/R	n
0,001	5,5
0,003	4,0
0,005	3,7
0,01	3,5
0,1	3,0

G.2.4 Толщина фланца

Для контакта металла с металлом и прокладок в виде уплотнительных колец:

$$e_f = 2{,}3 \cdot \sqrt{\frac{W_{раб}}{f} \cdot \frac{C-B}{2\pi \cdot C - \frac{n \cdot d}{2}}}. \qquad \text{(G.2-3)}$$

Для прокладок внутри диаметра окружности центров отверстий под болты

$$e_f = 1{,}1 \cdot \sqrt{\frac{W_{раб}}{f} \cdot \frac{C-B}{A-B-d}}, \qquad \text{(G.2-4)}$$

где n – количество болтов;
$W_{раб}$ – рабочая сила, определенная EN 13445-3:2009 (раздел 11).

Приложение H
(обязательное)

Экспериментальная процедура циклических испытаний давлением

H.1 Назначение

В настоящем приложении приводятся требования к испытаниям на усталость сосудов или частей сосудов, работающих под давлением, в случаях, когда невозможно выполнить адекватную оценку усталости из-за особой формы или недостаточного опыта.

Все приведенные требования образуют согласованный комплекс, который должен применяться как единое целое. Данные испытания также являются частью технической документации.

H.2 Применимость

Изготовление сосудов или частей сосудов, работающих под давлением, предполагает, что изготовитель обладает необходимой компетенцией и достаточным опытом изготовления в соответствии с указанным стандартом. Это означает, что испытания, проведенные изготовителем или признанной лабораторией, имеют силу только для того же изготовителя, производящего части с использованием того же процесса литья.

H.3 Требования к испытаниям

H.3.1 Общие положения

Условия испытаний выводят из максимальных условий эксплуатации. Если часть, работающая под давлением, подлежат циклическому испытанию давлением при температуре окружающей среды и если TS_{max} и TS_{min} отличаются от температуры испытаний, то давление испытаний увеличивают на $1/f_T$, в соответствии с формулой D.6-3 для ферритных марок и D.6.4 для аустенитных марок.

H.3.2 Количество деталей

При испытании на усталость используют случайные образцы, взятые из процесса производства сосуда или части сосуда, для определения допустимого количества циклов нагрузок. Это называется партией для испытаний на усталость.

H.3.3 Процедура

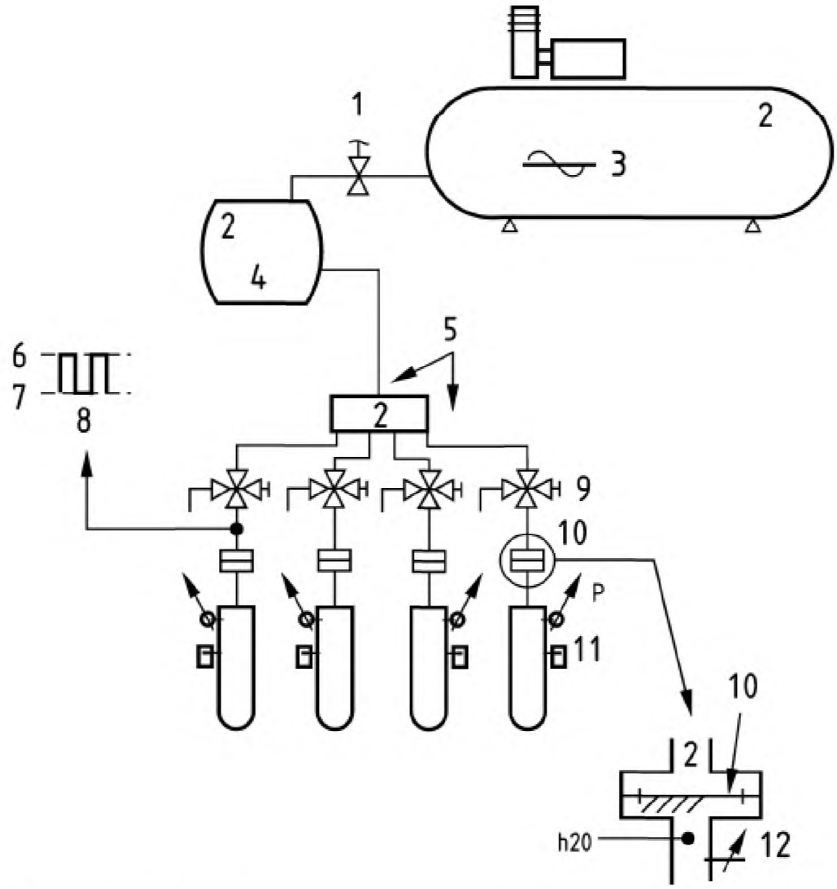
Убедиться, что испытуемые сосуды или части сосудов соответствуют чертежу и спецификации.

Убедиться, что сосуд или часть сосуда прошли механическую обработку по тем же размерам и заданным допускам, что и заводская деталь.

Убедиться, что используется калиброванный манометр; максимальный допуск должен соответствовать по меньшей мере классу 1 или лучше в соответствии с EN 837-1:1996 и EN 837-3:1996.

Шкала манометра должна составлять примерно 4/3 предполагаемого максимального давления циклических испытаний.

Для стенда может использоваться следующая схема испытаний.



1 – регулятор давления;
2 – воздушный резервуар;
3 – переменное давление;
4 – постоянное давление;
5 – как можно более короткий контур воздуха;
6 – P_{max};
7 – P_{min};
8 – частота импульсов давления;
9 – трехходовой клапан;
10 – мембрана;
11 – счетчик циклов;
12 – датчик уровня воды

Рисунок Н.1 – Схема испытаний

Циклы изменения давления выполняют в соответствии со следующей процедурой:

– заполнить испытуемую часть, работающую под давлением, некоррозионной средой, такой как масло, ингибированная вода или гликоль;

– провентилировать все воздушные карманы.

Скорость повышения давления не должна превышать 14 бар/с. Если при давлении более 80 % от расчетного разрывного давления скорость повышения давления превысит 3,5 бар/с, то либо необходимо регистрировать температуру, чтобы показать отсутствие аномального или чрезмерного нагрева сосуда, либо должна быть выдержка 5 с при следующем импульсе давления.

Убедиться, что количество циклов давления не превысит 10 циклов/мин.

Не допускается, чтобы в процессе испытаний возникали утечки и неплотности между частями с фланцами, прокладками или болтовыми соединениями.

Испытание не должно проводиться при помощи закрепленной конструкции на гидравлическом прессе, которая может противодействовать изгибающим напряжениям оболочки, приводя к ограничению свободного перемещения стенки под давлением.

Необходимо зафиксировать в отчете количество циклов до разрушения, а также расположение и описание места начала разрушения.

H.3.4 Испытания материала

Следующие испытания и исследования должны быть проведены для каждого сосуда, проходящего приемочный контроль:

– испытание гидравлическим давлением в соответствии с 7.2.1 проводится до циклического испытания давлением;

– визуальный осмотр в окончательном состоянии в соответствии с 7.1.1;

– магнитопорошковый контроль (только для ферритных марок). Контроль выполняется в соответствии с EN 1369:1996;

– после испытаний отбирают образец материала из места, где возникла усталостная трещина. Проводят следующие проверки:

a) измерение толщины;

b) исследование микроструктуры;

c) анализ вида излома.

H.4 Допустимое количество циклов

Чтобы уменьшить время испытаний, можно применить более высокое циклическое давление по сравнению с максимальным допустимым давлением. Требуется не менее трех испытаний. При каждом испытании давление циклически изменяется от минимального значения, обеспечиваемого установкой, P_{min} до $P_{max\ exp}$, при котором предполагается достижение предела упругости для самого напряженного элемента сосуда. В большинстве конструкций $2 \cdot PS \le P_{max\ exp} \le \min(P_{max}, 3 \cdot PS)$.

Если требуемая усталостная долговечность превышает 10 000 циклов, допускается ускорить испытание, приложив более высокий перепад циклического давления ΔP, где $\Delta P = P_{max\ exp} - P_{min}$.

Полученная средняя геометрическая усталостная долговечность (в циклах) не должна быть менее

$$N_{ср.геом} = \left(\frac{PS}{\Delta P}\right)^{m_c} \cdot N_{треб} \cdot F, \qquad (4\text{-}1)$$

где $N_{ср.геом}$ – средняя геометрическая усталостная долговечность, полученная из испытаний;

$N_{треб}$ – требуемое количество полных циклов давления;

PS – максимальное допустимое давление (МПа);

ΔP – перепад давления при испытании на усталость;

m_c – экспонента в формулах, описывающих расчетные кривые усталости;

F – коэффициент испытаний

Примечание – $N_{ср.геом}$ должно быть меньше по сравнению с $N_{треб.}$ Если значение все еще слишком высоко, можно использовать более высокое значение ΔP или большее количество образцов.

Коэффициент испытаний F зависит от требуемой вероятности безотказной работы, количества результатов испытаний и среднеквадратического отклонения $\log N$, σ. Для согласованности с расчетными кривыми $\Delta\sigma_R - N$ для чугуна с шаровидным графитом приложения D настоящего стандарта требуемая вероятность безотказной работы составляет 97,7 %. Значения k, которые соответствуют вероятности безотказной работы 97,7 % с достоверностью 95 %, приведены в таблице H.1. Значения для другого количества испытаний могут быть получены из ISO 12107.

Таблица H.1 – Значения k в зависимости от количества образцов для испытания

Количество испытаний	k
3	9,1
4	6,1
5	5,0
6	4,4
7	4,0
8	3,8
9	3,6
10	3,5

F выводится с использованием коэффициента одностороннего толерантного предела k следующим образом:

$$F = 10^{k\sigma}.$$

Среднеквадратическое отклонение $\log N$ может быть получено из этих испытаний или других репрезентативных испытаний.

Примечание – Среднеквадратическое отклонение $\log N$ – это мера разброса значений усталостной долговечности, полученных из нескольких испытаний на усталость.

Значения F для среднеквадратического отклонения 0,222, которое представляет собой наибольшее значение, полученное из испытаний на усталость сосудов, работающих под давлением, из чугуна с шаровидным графитом, приведены в таблице Н.2.

Таблица Н.2 – Значения *F*

Количество испытаний	*F*
3	105,3
4	22,6
5	12,6
6	9,4
7	7,8
8	6,9
9	6,3
10	5,8

Если при испытании получено меньшее значение для среднеквадратического отклонения $\log N = 0{,}222$, оно можно быть использовано.

Приложение Y
(справочное)

Отличия между EN 13445-6:2002 и EN 13445-6:2009

Редакция 2009 года EN 13445-6 содержит редакцию стандарта 2002 года, а также все поправки и исправления, внесенные за этот срок.

Самые важные изменения:

– добавление аустенитного чугуна;

– обновление свойств материала;

– увеличение допустимых расчетных параметров и максимального энергосодержания;

– переопределение эквивалентных полных циклов давления для статического нагружения;

–обавление проектирования путем расчетов для отливок;

– введение динамических нагрузок для чугуна с шаровидным графитом;

– добавление оценки усталостной долговечности, включая нагружение при экспериментальных циклических испытаниях давлением;

– добавление специальных требований к проектированию, часто используемых при проектировании отливок.

Приложение ZA
(справочное)

Взаимосвязь между настоящим европейским стандартом и существенными требованиями Директивы ЕС 97/23/ЕС по оборудованию, работающему под давлением

Настоящий европейский стандарт подготовлен по мандату, выданному Европейскому комитету по стандартизации (CEN) Европейской комиссией и Европейской ассоциацией свободной торговли, и направлен на выполнение существенных требований Директивы 97/23/ЕС по Новому подходу к оборудованию, работающему под давлением.

После того как настоящий стандарт внесен в Официальный журнал Европейского союза по данной Директиве и внедрен в качестве национального стандарта по меньшей мере одним государством-членом, соответствие разделам настоящего стандарта, указанным в таблице ZA.1, подразумевает выполнение соответствующих существенных требований этой Директивы и связанных норм EFTA в пределах области применения настоящего стандарта.

Таблица ZA.1 – Соответствие между настоящим европейским стандартом и Директивой 97/23/ЕС по оборудованию, работающему под давлением

Раздел (ы)/подраздел (ы) данного европейского стандарта	Существенные требования Директивы 97/23/ЕС по оборудованию, работающему под давлением	Квалификационные замечания/примечания
4.1, 4.2, 5.2, приложение D, приложение E, приложение G	2.2.3	Метод вычисления
5.2.2.1.5 и 5.2.2.1.6, приложение H	2.2.4	Экспериментальный метод проектирования
5.3, 6, 7.1	3.1	Процедуры изготовления
9.1	3.1.5	Прослеживаемость
7.2	3.2	Окончательная оценка
7.1	3.2.1	Контроль
7.2.2	3.2.2	Проверочные испытания
9	3.3	Маркировка
5.1, приложение A	4.1	Материалы для частей, находящихся под давлением

ВНИМАНИЕ – К изделиям, подпадающим под область применения настоящего стандарта, могут применяться иные требования и иные директивы ЕС.

Библиография

[1] Gorsitzke, B.: Berechnung der Ermüdungslebensdauer wechselbeanspruchter Druckbehälter aus Gusseisen mit Kugelgrafit .
Горзитцке, Б. Расчет продолжительности усталости резервуаров, работающих под знакопеременной нагрузкой, из чугуна с шаровидным графитом

[2] Kikkert, J. Bepaling van de elasticiteitsgrens van verschillende nodulaire gietijzersoorten op verhoogde temperatuur
Киккерт, Й. Определение границ эластичности различных сортов чугуна с шаровидным графитом при повышенной температуре

[3] ISO/CD 1083 Чугун с шаровидным графитом (2001-01-18)

[4] EN 13068-1:1999 Контроль неразрушающий. Рентгеноскопический контроль. Часть 1. Количественное измерение характеристик формирования изображения

[5] EN 13068-2:1999 Контроль неразрушающий. Рентгеноскопический контроль. Часть 2. Проверка долговременной стабильности устройств формирования изображений

[6] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen. Schiele & Schön, 1995
Хассе, С. Ковкий чугун. Schiele & Schön, 1995

[7] SFS 3320 Проектирование сосудов, работающих под давлением. Выпуклая крышка

[8] ISO 12107:2003 Материалы металлические. Испытание на усталость. Планирование статистическое и анализ данных

Ответственный за выпуск *В. Л. Гуревич*

Сдано в набор 22.03.2010. Подписано в печать 21.04.2010. Формат бумаги 60×84/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Arial. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 11,16 Уч.- изд. л. 5,64 Тираж экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение:
Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации» (БелГИСС)
ЛИ № 02330/0552843 от 08.04.2009.
ул. Мележа, 3, комн. 406, 220113, Минск.

gost.e-ecolog.ru