

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

Test methods of plasma equipment for electroheat and electrochemical applications

Méthodes d'essai des équipements plasma pour applications électrothermiques et électrochimiques



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

Test methods of plasma equipment for electroheat and electrochemical applications

Méthodes d'essai des équipements plasma pour applications électrothermiques et électrochimiques

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

CONTENTS

| | |
|--|----|
| FOREWORD..... | 3 |
| 1 Scope and object..... | 5 |
| 2 Normative references | 5 |
| 3 Terms and definitions | 5 |
| 4 Type and general conditions of tests | 9 |
| 4.1 List of tests and measurements applicable to thermal plasma torch systems | 9 |
| 4.1.1 Arc plasma systems..... | 9 |
| 4.1.2 Inductive plasma systems..... | 11 |
| 4.2 List of measurements and tests applicable to installations using plasma torches | 11 |
| 4.2.1 Spraying installations | 11 |
| 4.2.2 Solid, liquid and gaseous charge heating and electrochemical installations | 12 |
| 4.3 General test conditions..... | 13 |
| 5 Description of testing and measuring methods..... | 13 |
| 5.1 Tests applicable to plasma systems | 13 |
| 5.1.1 Arc plasma torch systems..... | 13 |
| 5.1.2 Inductive plasma torch..... | 16 |
| 5.2 Tests applicable to installations using plasma torches..... | 18 |
| 5.2.1 Spraying installations or equipment | 18 |
| 5.2.2 Solid, liquid and gaseous charge heating and electrochemical installations | 19 |
| 6 Reference tables | 20 |
| Annex A (normative) Standard energy efficiency definition of d.c. arc plasma torch and plasma torch system | 21 |
| Annex B (informative) Human exposure to electromagnetic fields | 23 |
| Annex C (normative) Standard energy efficiency definition of inductive plasma torch and torch system | 24 |
| Bibliography..... | 26 |

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**TEST METHODS OF PLASMA EQUIPMENT FOR ELECTROHEAT
AND ELECTROCHEMICAL APPLICATIONS**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical specification when

- the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts, or
- the subject is still under technical development or where, for any other reason, there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard.

Technical specifications are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards.

IEC 60680, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 27: Industrial electroheating equipment.

This first edition of IEC 60680/TS cancels and replaces the first edition of International Standard IEC 60680 published in 1980. It constitutes a technical revision.

The significant changes with respect to the previous edition are as follows:

- the previous edition focused on arc heating means and on spraying applications – this TS applies to all means of production of thermal plasma, i.e. arc and induction heating, and to the equipment directly coupled to these means;
- new items/issues have been added:
 - test methods for inductive plasma torch systems and for thermochemical treatment equipment (4.1.2, 5.1.2, 4.2.2, 5.2.2);
 - new test methods for spraying applications (4.2.1.3, 5.2.1.2);
 - protection against electromagnetic emissions (including Annex B);
 - detailed efficiency definitions, for both arc and inductive heating torch and system (Annex A and Annex C);
- terms and definitions have been updated according to the second edition of IEC 60050-841.

The text of this technical specification is based on the following documents:

| | |
|---------------|------------------|
| Enquiry draft | Report on voting |
| 27/581/DTS | 27/605A/RVC |

Full information on the voting for the approval of this technical specification can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- transformed into an International standard,
- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

TEST METHODS OF PLASMA EQUIPMENT FOR ELECTROHEAT AND ELECTROCHEMICAL APPLICATIONS

1 Scope and object

This Technical Specification specifies test methods for

- a) thermal plasma torch systems:
 - arc plasma systems;
 - inductive plasma systems;
- b) installation using thermal plasma torch systems:
 - spraying equipment;
 - solid, liquid and gaseous charge heating and thermochemical treatment equipment.

Test methods for plasma torches for welding, cutting and allied processes are specified in IEC 60974-7.

The object of this specification is to standardize the test methods and conditions for determining the main parameters and technical characteristics of thermal plasma torch systems and of installations (or equipment) using one or more plasma torch systems.

Not all the tests specified are applicable to every type of equipment, covered by this specification. It is necessary to select those tests which are applicable to a specified plasma torch system or installation. This selection is effective in the specification.

Safety requirements for systems and installations or equipment specified in a) and b) are given in IEC/TS 60519-5.

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.

IEC 60050-841:2004, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 841: Industrial electroheat*

IEC 60398:1999, *Industrial electroheating installations – General test methods*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-841 and the following apply.

3.1

plasma

any ionized gas consisting of free electrons, ions and neutral particles (atoms and/or molecules and/or radicals), electrically neutral on a macroscopic scale and electrically conductive

[IEV 841-31-01, modified]

3.2

thermal plasma

plasma in local thermodynamic equilibrium, at around atmospheric pressure or above

NOTE In IEC standards, related to equipment or installations, the use of the plain word "plasma" for "thermal plasma" is tolerated.

[IEV 841-31-07]

3.3

plasma heating

method of heating using thermal plasma as a heat source

[IEV 841-31-02]

3.4

arc plasma

arc thermal plasma

thermal plasma generated by an electric discharge between electrodes in a fluid

NOTE The plasma arc column is characterized by high current density, up to 100 A/mm², at pressures of the same order as atmospheric pressure.

[IEV 841-31-10]

3.5

inductive plasma

thermal plasma in which ionization is obtained by excitation of a gas in a high-frequency electromagnetic field

[IEV 841-31-12, modified]

3.6

plasma gas

any gas, vapour or fluid to be brought to the state of plasma

[IEV 841-31-14]

3.7

plasma torch

electroheat equipment in which an inlet gas stream is converted by electric energy supplied to a plasma flow prior to its ejection

[IEV 841-31-29]

3.8

arc plasma torch

electroheat equipment in which an inlet gas stream is converted to a plasma flow by electric energy supplied from an arc discharge prior to its ejection

NOTE Arc plasma torches can be supplied either by AC or DC current.

[IEV 841-31-30]

3.9

transferred arc plasma torch

arc plasma torch in which the main arc is maintained between an internal electrode (contained within the torch) and a liquid or solid medium (or a solid workpiece), electrically conductive, constituting or including an external electrode for current return

[IEV 841-31-32]

3.10**non-transferred arc plasma torch**

arc plasma torch in which the main arc is maintained between two or more electrodes regarded as torch components

[IEV 841-31-31]

3.11**plasma jet**

high velocity plasma flow supplied by a non-transferred arc plasma torch or by an inductive plasma torch

[IEV 841-31-18]

3.12**non-electrode plasma torch**

plasma torch with no electrode, supplied by high frequency source of inductive or capacitive type

[IEV 841-31-36)

3.13**induction plasma torch**

plasma torch in which the plasma flow is generated by an a.c. high-frequency magnetic field produced by a high-frequency current established in a coil

[IEV 841-31-38, modified]

3.14**ignition of a plasma torch**

initiation of the transition from non-ionized plasma gas to plasma state, carried into effect by a starting-up equipment

[IEV 841-31-15, modified]

3.15**high-frequency ignition device (of a plasma torch)**

device used in an arc plasma torch to ignite the arc by a high voltage and high-frequency electric discharge between the electrodes

[IEV 841-31-16, modified]

3.16**short-circuit ignition device (of a plasma torch)**

device used in an arc plasma torch to ignite the arc by creating a short circuit between the electrodes

[IEV 841-31-17]

3.17**nozzle (of a plasma torch)**

part of a plasma torch allowing shaping the plasma flow prior to its ejection in order to increase its speed and/or its energy density

[IEV 841-31-40, modified]

3.18**cathode (of a non-transferred or transferred plasma torch)**

negative electrode of a d.c. arc plasma torch

NOTE 1 The cathode may be made of a high electrical and thermal conductivity material, such as copper (water cooled) or of a refractory metal, such as wolfram, or of graphite, water cooled if necessary.

NOTE 2 The return current electrode of a transferred plasma torch serves sometimes as the cathode.

[IEV 841-31-42, modified]

3.19

anode (of a non-transferred or transferred plasma torch)
positive electrode of a d.c. arc plasma torch

NOTE 1 The anode is usually made of a high electrical and thermal conductivity material, such as copper, and water cooled.

NOTE 2 The return current electrode of a transferred plasma torch serves in most cases as the anode.

NOTE 3 In a non-transferred plasma torch, the anode is often the torch nozzle.

[IEV 841-31-41]

3.20

normal operation of a plasma torch

operation characterized by reproducible working conditions defined by the type and composition of the gas, its mass flow rate and the arc current

3.21

specified current of a plasma torch

maximum current which can be used (for a given plasma gas) by a plasma torch

3.22

specified power of a plasma torch

maximum power which can be used (for a given plasma gas) by a plasma torch

3.23

thermal power of a plasma torch

thermal power delivered by the torch, defined as the gas mass flow rate multiplied by its average enthalpy

3.24

energy efficiency of a plasma torch

ratio of delivered thermal power to the active input power

3.25

plasma temperature

instantaneous local temperature within a plasma

[IEV 841-31-45]

3.26

plasma average enthalpy

plasma mean enthalpy

quotient of the power delivered by the plasma torch by the plasma gas mass flow rate

[IEV 841-31-44]

3.27

plasma system

equipment for the production of thermal plasma, consisting of the plasma torch, its power supply, gas and cooling utilities and a control unit

3.28**plasma furnace**

electroheat equipment comprising a refractory lined chamber in which a charge is heated by one or more plasma torches and generally used to melt or to smelt materials at high temperatures

[IEV 841-31-25]

3.29**plasma reactor**

electroheat equipment comprising a chamber for a thermochemical processing of material by plasma torches

[IEV 841-31-27]

3.30**plasma installation**

installation to carry on the plasma process, consisting of a plasma system and, in most cases of a plasma furnace or reactor, including all necessary auxiliary equipment for heating or thermally treating materials

3.31**plasma spraying**

coating in which material introduced in the form of powder or wire and melted in a plasma jet is sprayed onto a surface

[IEV 841-31-24]

3.32**powder deposition efficiency**

ratio of the mass flow rate of powder consolidated on a substrate to the mass flow rate of powder fed to the torch

4 Type and general conditions of tests**4.1 List of tests and measurements applicable to thermal plasma torch systems****4.1.1 Arc plasma systems**

Arc plasma systems shall be subjected to the following tests and measurements.

4.1.1.1 Arc power supply tests

Power supplies used for arc plasma generation are generally either a.c. of 50 Hz or 60 Hz, or d.c., obtained by using semiconductor devices, for example thyristors, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) or IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor).

For a.c. and d.c. type supply, the following tests are applicable:

- a) verification of equipotential bonding by measurement;
- b) measurement of insulation resistance;
- c) dielectric test;
- d) regulation mode test:
 - off-load test,
 - on-load test;
- e) determination of energy efficiency;

For d.c. type supply only:

- f) measurement of ripple factor.

4.1.1.2 Gas circuit tests

The flow/pressure characteristics of the gas circuit shall be determined.

4.1.1.3 Cooling circuit tests

The following measurements and tests are applicable:

- a) determination of the flow/pressure characteristics;
- b) measurement of cooling liquid inlet and outlet temperature as a function of the mass flow rate at maximum steady-state power of the plasma system;
- c) measurement of the cooling liquid electrical resistivity.

4.1.1.4 Ignition test

For plasma systems ignited by a high frequency device, measurements of electromagnetic emissions around the ignition device shall be made according to the regulations in force in the country in which the plasma system is to be used. They shall comply with local regulations.

4.1.1.5 Plasma torch tests

The followings standard tests are performed assuming that the torch operates at external atmospheric conditions:

- a) static sealing test under cooling liquid filling;
- b) verification of equipotential bonding by measurement;
- c) measurement of insulation resistance;
- d) dielectric test;
- e) ignition test:
 - high frequency ignition device:
 - check of ignition capability for the plasma gas(es) to be used,
 - short-circuit ignition device:
 - electrical continuity,
 - check of ignition capability for the plasma gas(es) to be used;
- f) determination of the voltage/current characteristics at several plasma gas mass flow rates, for each specified plasma gas;
- g) determination of the thermal power and electrical power under different operating conditions;
- h) determination of the average enthalpy under different operating conditions;
- i) determination of energy efficiency;
- j) temperature measurement of accessible parts of the torch;
- k) acoustic level measurement under different operating conditions;
- l) electromagnetic emissions measurement under different operating conditions, according to appropriate standards;
- m) for arc transferred plasma torch, thermal radiation measurement under different operating conditions;
- n) electrodes erosion measurement.

NOTE This type of measurement is not obligatory and results from an agreement between the manufacturer and the user.

4.1.2 Inductive plasma systems

Inductive plasma systems shall be subjected to the following measurements and tests.

4.1.2.1 Inductive power supply tests

Power supplies used for RF inductive plasma generation are generally operated in the radio frequency MHz range (typically between 2 MHz and 27,6 MHz). Exceptionally, this range is extended downwards to the 200 kHz to 300 kHz range and upwards up to 40 MHz. Power supplies operating with frequencies in the MHz range at power levels of tens to hundreds kW are generally of the triode type oscillators.

The following tests are applicable:

- a) verification of equipotential bonding by measurement;
- b) measurement of insulation resistance;
- c) circuit protection test;
- d) determination of energy efficiency.

4.1.2.2 Gas circuit tests

See 4.1.1.2.

4.1.2.3 Cooling circuit tests

See 4.1.1.3.

4.1.2.4 Ignition test

See 4.1.1.4.

4.1.2.5 Plasma torch tests

Apply 4.1.1.5, except item n) (non-electrode torch).

4.2 List of measurements and tests applicable to installations using plasma torches

4.2.1 Spraying installations

Spraying installations shall be subjected to the following measurements and tests.

4.2.1.1 Arc plasma torch systems

See 4.1.1 for arc plasma systems.

4.2.1.2 Inductive plasma systems

See 4.1.2 for inductive plasma systems.

4.2.1.3 Plasma spraying equipment measurements and tests

In spraying applications, the material to be treated is a powder, wire or liquid. The following measurements and tests are applicable:

- a) powder used for operation:
 - 1) determination of range of particle size,
 - 2) determination of the fluidity of the feeding particles flow,
 - 3) determination of the carrier gas circuit mass flow rate/pressure characteristics,

- 4) determination of maximum feed rate as a function of the maximum power of the equipment,
- 5) determination of the powder deposition efficiency (3.32);
- b) wire used for operation:
 - 1) determination of the wire diameter,
 - 2) determination of maximum feed rate as a function of the maximum power of the equipment;
- c) liquid used for operation:
 - 1) injection system:
 - characterization of the gas atomization,
 - characterization of the mechanical injection (drops or jets);
 - 2) solutions:
 - concentration of the precursor and composition,
 - solvent used;
 - 3) suspension:
 - solvent used,
 - dispersant used,
 - determination of the particle size and morphology,
 - determination of the particle weight percentage.

The workpiece shall be grounded, when using plasma transferred arc reclamation.

4.2.2 Solid, liquid and gaseous charge heating and electrochemical installations

Solid, liquid and gaseous charge heating and electrochemical installations shall be subjected to the following measurements and tests.

4.2.2.1 Thermal plasma torch systems

See 4.1.1 and 4.1.2.

Item b) of 4.1.1.3 shall take into account the extra losses in the plasma torch cooling circuit due to the location, partial or total, of the torch in the high temperature atmosphere of the furnace or reactor.

4.2.2.2 Heating and thermochemical treatment equipment

The following measurements and tests are applicable:

- a) determination of the gas circuit pressure/temperature characteristics, including gas(es) used for the torch, for different operating conditions;
- b) verification of equipotential bonding by measurement;
- c) acoustic level measurement;
- d) temperature measurement of accessible parts of the equipment (in particular the furnace and/or the reactor);
- e) identification of risks linked to the production of toxic products;
- f) identification of the explosion hazard situations;
- g) measurement of cooling liquid inlet and outlet temperatures as a function of the mass flow rate at maximum continuous power of the equipment;
- h) determination of the cooling circuit mass flow rate/pressure characteristics.

4.3 General test conditions

General test conditions according to IEC 60398 apply.

5 Description of testing and measuring methods

5.1 Tests applicable to plasma systems

5.1.1 Arc plasma torch systems

5.1.1.1 Arc power supply tests

For a.c. and d.c. type systems the following measurements and tests apply:

- a) verification of equipotential bonding by measurement:
 - a current of 10 A shall be applied to measure the mass continuity, in m Ω ;
- b) measurement of insulation resistance:
 - a voltage of 500 V d.c. shall be applied for 1 min without breakdown for low voltage circuits;
 - a voltage of 1 000 V d.c. shall be applied for 1 min without breakdown for high voltage circuits;
 - for low voltage circuits, the insulation resistance shall be not less than 3 M Ω ;
 - for high voltage circuits, the insulation resistance shall be not less than 100 M Ω ;
- c) dielectric test:
 - a practically sinusoidal voltage of mains frequency 50 Hz or 60 Hz, the value of which is specified below, is applied for 1 min;
 - at the beginning of the test, the voltage applied is less than half of the prescribed value, and is then rapidly raised to the test value.
 - The specified values are as follows:
 - installation with a rated voltage lower than or equal to 50 V; test voltage: 500 V;
 - installation with a rated voltage U above 50 V; test voltage $2U + 1\,000$ V (minimum 1 500 V);
- d) regulation mode tests:
 - measurement of the open-circuit voltage;
 - on-load tests:
 - short-circuit tests,
 - resistive load tests (resistance value lower than 1 Ω) to determine the current accuracy;
- e) determination of energy efficiency:
 - measurement of the energy losses, at low voltage and operating currents, to determine the energy efficiency, by measuring the input and output power at rated conditions as specified.

For d.c. type systems the following measurement applies:

- f) measurement of ripple factor:
 - measurement of the current ripple at specified power (agreed between the manufacturer and the user) with resistive load.

NOTE The ripple factor is defined as the ratio of the root mean square value of the ripple to the mean d.c. value of the measured current.

5.1.1.2 Gas circuit tests

The flow/pressure characteristics of the gas circuit shall be determined in the pressure range specified by the manufacturer.

The gas flow rate is generally expressed in Nm³/h or in NI/min. The gas pressure, ahead from the gas circuit distribution to the torch, shall be measured by means of a pressure gauge. The flow shall be measured by means of a flowmeter to get the mass flow rate of the specified plasma gas, ahead the torch.

5.1.1.3 Cooling circuit tests

The following measurements and tests are applicable:

- a) determination of the flow/pressure characteristics;

The cooling liquid mass flow rate, mostly water, is given in m³/h. The flow/pressure characteristics will be measured by simulating the torch pressure drop, using a flowmeter at the outlet of the pressure drop device and two pressure gauges located on both sides of this device, including all pipes.

- b) measurement of cooling liquid inlet and outlet temperature as a function of its mass flow rate at maximum steady-state power of the plasma system;

The cooling water temperature difference shall be measured at the terminals of the torch, including all the hoses. If thermoelectric sensors such as thermistors are used, they shall be electrically insulated from the cooling liquid. The measurements shall be made at the mass flow rate and pressure recommended by the torch manufacturer. With the measurements of temperatures and mass flow rate, the torch losses can be calculated.

- c) measurement of the cooling liquid resistivity;

The resistivity of the cooling liquid is generally given in Ω.cm²/cm. The resistivity shall be measured ahead of the pressurized cooling circuit at the maximum temperature. Deionised water should be used when appropriate.

5.1.1.4 High frequency ignition circuit measurements

Measurements of electromagnetic emissions apply for the protection of personnel.

The measurements are performed according to the regulations in force in the country in which the plasma system is to be used. They shall comply with local regulations.

5.1.1.5 Plasma torch characteristics

The following measurements and tests are applicable:

- a) static sealing test under cooling liquid filling;

The torch, with all orifices capped, shall be pressurized under the cooling liquid at a static pressure specified by the manufacturer, during 5 min. No leakage shall occur.

- b) verification of equipotential bonding by measurement;

See 5.1.1.1, a).

- c) measurement of insulation resistance;

See 5.1.1.1, b).

- d) dielectric test;

See 5.1.1.1, c).

- e) ignition test;

The ignition conditions, depending on the type of ignition device shall be determined according to the following measurements and tests:

– for high-frequency ignition device

- control of ignition capability

After connecting the ignition circuit to the plasma torch, in compliance with the manufacturer specifications, the (selected) plasma gas mass flow rate is adjusted to produce the high frequency spark necessary to ignite the main arc, then supplied by the main current.

NOTE In particular torches, the electrode gap is also adjustable, providing another means to adjust the starting conditions.

– for short-circuit ignition device

- measurement of electrical continuity

The arc is ignited by an initial short-circuit between the main electrodes, either through an auxiliary movable device or through the movable main electrodes; this short-circuit is checked with an ohmmeter.

- control of ignition capability

The main arc current, at low value specified by the torch manufacturer, is supplied to the main electrodes through the short-circuit for a very short time (less than 1 s); then, either the auxiliary device or the main electrodes are moved to their nominal position for the development of the main arc within the (selected) plasma gas stream, which mass flow rate is adjusted to maintain the arc.

f) determination of the arc voltage/current characteristics under different operating conditions, for each specified plasma gas;

The arc voltage/current characteristics are measured for several plasma gas mass flow rates, each characteristic being drawn for a constant mass flow rate, in the whole range of values as specified by the manufacturer.

NOTE For transferred arc, characteristics are determined for a given distance between the torch and the workpiece.

g) determination of the thermal power and electrical power;

The electrical power is the active power supplied to the torch, in kW, measured at the power supply(ies) terminals through appropriate meters supplied by the manufacturer. The thermal power is the power delivered by the torch, in kW, basically regarded as the difference between electrical power and losses in the cooling circuit; a more accurate definition is provided in Annex A, with the calculations regarding the energy efficiency of the torch.

h) determination of the average enthalpy under different operating conditions;

The average enthalpy, in joules/kg of gas, is determined as the ratio of the thermal power to the plasma gas mass flow rate. However, this measurement is generally not obligatory for spraying applications.

i) determination of energy efficiency;

The energy efficiency is the ratio of the thermal power delivered by the torch to the active electrical power supplied to the torch; for more accurate description, see Annex A.

j) measurement of temperature of accessible parts of the plasma torch;

The surface temperature at different points of accessible parts of the torch shall be measured when conditions of steady state at the maximum continuous power of the torch have been obtained during operation, by any conventional method.

k) acoustic level measurement;

The measurement shall comply with the safety regulations in force in the country in which the equipment is to be used.

l) electromagnetic emissions measurement under different operating conditions, according to relevant standards, for examples see Annex B;

m) thermal radiation measurement under different operating conditions;

The transferred arc torch radiate energy coming from the hot arc. The heat flux shall be measured by a radiometer.

n) electrodes erosion measurement.

Electrode (and nozzle when used as an electrode) wear may be expressed by metal weight loss (gram) per unit time (hour) under conditions agreed between the manufacturer and the user. It shall be determined by weighing the electrodes and measuring the corresponding operating time. For spraying applications, the compensation of the electrode erosion is important for the quality of the coating.

5.1.2 Inductive plasma torch

5.1.2.1 Inductive power supply tests

The following measurements and tests are applicable:

- a) verification of equipotential bonding by measurement:
 - a current of 10 A shall be applied to measure the mass continuity in mΩ;
- b) measurement of insulation resistance:
 - a voltage of 500 V d.c. shall be applied for 1 min without breakdown for low voltage circuits;
 - a voltage of 1000 V d.c. shall be applied for 1 min without breakdown for high voltage circuits;
 - for low voltage circuits, the insulation resistance shall be not less than 3 MΩ;
 - for high voltage circuits, the insulation resistance shall be not less than 100 MΩ;
- c) circuit protection tests:
 - overload trip plate and grid current overload measured and tested;
 - door switch and torch enclosure (Faraday cage) interlock shall disconnect the main power supply breaker;
- d) determination of energy efficiency:
 - measurement of the power supply losses at low, medium, and high power conditions under calorimeter load and plasma conditions.

5.1.2.2 Gas circuit tests

The flow/pressure characteristics of the gas circuit shall be determined.

The gas flow rate is generally expressed in Nm³/h or l/min. The ratio of gas pressure and flow shall be determined by means of a pressure gauge placed at the inlet of the torch, pipes included, and a flowmeter inserted in the circuit ahead of the pressure gauge. The measurements shall preferably be taken on a torch operating with the gas flows recommended by the manufacturer.

5.1.2.3 Cooling circuit characteristics

The following measurements and tests are applicable:

- a) determination of the flow/pressure characteristics:
 - the cooling liquid mass flow rate, generally water, is given in m³/h or l/min. The pressure gauge shall be placed at the inlet of the cooling circuit pipeline of the torch, including all pipes. The flow shall be measured either volumetrically or by means of a flow meter inserted in the cooling circuit downstream of the torch;
- b) measurement of cooling liquid inlet and outlet temperatures as a function of its mass flow rate at maximum steady-state power of the plasma system:

- the cooling water temperature difference shall be measured as close as possible to the torch, including the hoses. If thermoelectric sensors such as thermocouples or thermistors are used, they shall be insulated from the cooling liquid. The measurements shall be made at the mass flow rate and pressure recommended by the torch manufacturer;
 - with the measurements of temperatures and mass flow rate, the torch losses can be calculated, in kW;
- c) measurement of the cooling liquid resistivity:
- the resistivity of the cooling liquid is given in $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$;
- d) ignition test:
See 5.1.1.4.

5.1.2.4 Plasma torch measurements and tests

The following measurements and tests are applicable:

- a) static sealing test under cooling liquid filling:
- the torch, with all orifices capped, shall be pressurized under the cooling liquid at a specified (by the manufacturer) static pressure for 5 min. No leakage shall occur;
- b) verification of equipotential bonding by measurement;
See 5.1.2.1, a).
- c) measurement of insulation resistance;
See 5.1.2.1, b).
- d) ignition test:
- check of ignition capability of high frequency ignition device
after connecting the ignition circuit to the plasma torch, in compliance with the manufacturer specifications, the (selected) plasma gas mass flow rate and pressure are adjusted to produce the high frequency spark necessary to ignite the plasma discharge, which will be maintained by the magnetic flux;
 - discharge rod igniter device
the discharge rod shall be properly insulated from ground or from the operator. Measurement of electrical insulation from earth shall be done with an ohmmeter;
 - self-ignition under vacuum pressure
measurement of plate voltage, frequency, and pressure necessary for proper plasma ignition under argon atmosphere;
the voltage, frequency and pressure shall be within the value range specified by the manufacturer;
- e) determination of the plate voltage/current characteristics under different operating conditions
the plate voltage/current characteristics are measured for several plasma gas mass flow rates and pressure, each characteristic being drawn for a constant mass flow rate, in the whole range of values as specified by the manufacturer;
- f) determination of the thermal power and electrical power
the electrical power is the d.c. plate power supplied to the tube oscillator, in kW, measured before the RF triode inside the power supply(ies) through appropriate meters supplied by the RF power supply manufacturer. This plate power includes the power delivered to the torch terminals and the losses inside the triode and the circuit of the RF generator;
the thermal power is the power delivered by the torch, in kW, basically regarded as the difference between plate electrical power and losses in the cooling circuit of the torch and the RF generator triode and the resonance circuit; a more accurate definition is provided in Annex C, with the calculations regarding the energy efficiency of the torch;

- g) determination of the average enthalpy under different operating conditions
the average enthalpy, in joules/kg of gas, is determined as the ratio of the thermal power to the plasma gas mass flow rate;
- h) determination of energy efficiency
the energy efficiency is the ratio of the thermal power delivered by the torch to the active electrical power supplied to the torch ; a more accurate definition is provided in Annex C;
- i) acoustic level measurement
the measurement shall comply with the safety regulations in force in the country in which the equipment is to be used;
- j) electromagnetic emission measurements under different operating conditions, at several locations around the torch in operation with the Faraday cage surrounding the torch closed (see also Annex B);
measurements of radiated electric and magnetic fields shall be performed on an induction plasma torch system fed by a RF power supply and operating at the nominal frequency and maximum power rating of the system. The measurements should be made for the nominal operating frequency bandwidth. The manufacturer can limit measurements to each generic system configuration;
the measuring antenna should be located at the main operator location and 10 m from the torch, perpendicularly to the direction of the plasma flow in the four cardinal orientation;
- k) visible radiation measurement under different operating conditions
not applicable if plasma discharge is maintained in a restricted area.

5.2 Tests applicable to installations using plasma torches

5.2.1 Spraying installations or equipment

5.2.1.1 Plasma torch systems

See 5.1.1 and 5.1.2.

5.2.1.2 Spraying equipment

The following measurements and tests are applicable when using a powder or wire as the material to be treated:

- a) powder used for operation:
 - 1) determination of range of particle size,
Standard type sieves shall be used, the mesh usually measured in micrometres.
 - 2) determination of the fluidity of the feeding particles flow,
It is determined as the ratio of the powder quantity and time of flowing through a gauge orifice (e.g. diameter 3 mm, length 5 mm).
 - 3) determination of the carrier gas circuit mass flow rate/pressure characteristics,
This test shall be carried out using the powder for the specific application. The carrier gas flow rate shall be adjusted to the working conditions of the torch, the injection position and the tilting as well as the powder size distribution, specific mass and morphology. The pressure gauge shall be inserted ahead of the powder feeding system and the flowmeter ahead of the pressure gauge.
 - 4) determination of the deposition efficiency,
For the powder to be sprayed, the working conditions for the torch, the injector position and tilting and the deposition efficiency should be measured. This can be achieved, for example by using an aluminium alloy substrate which size is at least six to ten times that of the sprayed spot;
- b) wire used for operation:

- 1) determination of diameter,

The wire diameter shall be measured by conventional means with the permissible limits specified by the torch manufacturer.

- 2) determination of maximum feed rate as a function of the maximum power of the equipment.

This test shall be carried out using the sprayed wire with the diameter specified by the torch manufacturer.

5.2.2 Solid, liquid and gaseous charge heating and electrochemical installations

5.2.2.1 Plasma torch systems

See 5.1.1 and 5.1.2.

5.2.2.2 Heating and thermochemical treatment equipment

The following measurements and tests are applicable:

- a) determination of the gas circuit pressure/temperature characteristics, including gas used for the torch;

The pressure and the temperature shall be measured continuously in the furnace (or reactor) or in the exhaust pipe near by the furnace (or reactor).

- b) verification of equipotential bonding by measurement;

See 5.1.1.1, a).

- c) acoustic level measurement;

The noise level shall be measured in compliance with the safety regulations in force in the country in which the furnace or reactor is to be used.

- d) temperature measurement of accessible parts of the furnace or reactor;

This measurement shall be made during normal operation of the furnace or reactor, at maximum continuous power, using both conventional and optical surface temperature measuring methods at various points in condition of steady-state operation.

- e) risks analysis linked to the eventual production of toxic products, in compliance with the safety regulations in force in the country in which the furnace (or the reactor) is to be installed and operated;

- f) risks analysis linked to explosion hazard situations, in compliance with the safety regulations in force in the country in which the furnace (or the reactor) is to be installed and operated;

- g) measurement of cooling liquid inlet and outlet temperatures as a function of the mass flow rate at maximum continuous power of the equipment;

The cooling liquid temperature difference shall be measured at the inlet and outlet terminals of each of the equipment elements, including pipes. If thermoelectric sensors such as thermocouples or thermistors are used, they shall be electrically insulated from the cooling liquid. The measurements shall be made at the mass flow rate and pressure recommended by the equipment manufacturer.

- h) determination of the cooling circuit mass flow rate/pressure characteristics.

The pressure gauge and the flowmeter shall be placed on or at the outlet of the equipment to be cooled.

6 Reference tables

For some applications, it shall be necessary to correlate the torch performance with high temperature (or enthalpy) reference tables. As examples, Mollier diagrams and plasma chemical composition charts, established case by case for each used plasma gas, are generally used when available, or calculated for each plasma gas.

Reference tables, when used, shall be indicated, as agreed between the manufacturer and the user.

Annex A (normative)

Standard energy efficiency definition of d.c. arc plasma torch and plasma torch system

A.1 Plasma torch

The energy efficiency (see 3.24) is the quotient of the energy (or power) contained in the plasma gas coming out from the torch to the total active energy (or power) supplied to the torch.

The standard energy efficiency is measured with regards to a plasma flow discharged to the external atmosphere.

The following parameters are taken into account:

| | |
|------------------|---|
| U_e | arc voltage |
| I_e | arc current |
| U_b | magnetic coil voltage |
| I_b | magnetic coil current |
| Q_a | plasma gas mass flow rate |
| H_{ae} | inlet plasma gas enthalpy |
| Q_e | cooling liquid mass flow rate |
| H_{ee} | inlet cooling liquid enthalpy |
| H_{es} | outlet cooling liquid enthalpy |
| H_{as} | outlet plasma gas enthalpy (enthalpy of the gas delivered by the torch) |
| ΣW_{aux} | power supplied to the auxiliaries of the plasma system |
| W_e | power supplied to the torch |
| η_t | torch energy efficiency |
| η_s | system energy efficiency |

Considering the torch as a closed system, the sum of enthalpies (in and out) of this system equals 0.

NOTE 1 The torch is cooled, so the energy released to the external atmosphere is 0.

NOTE 2 The following equation takes into account the energy dissipated in a magnetic coil externally supplied (from the main arc), corresponding to a torch model widely used. For the case without magnetic coil, the term $U_b I_b$ is 0.

The plasma torch energy efficiency is:

$$\eta_t = \frac{Q_a H_{as}}{W_e} \quad (\text{A.1})$$

where

$$Q_a H_{as} = Q_e (H_{ee} - H_{es}) + Q_a H_{ae} + U_e I_e + U_b I_b \quad (\text{A.2})$$

$$W_e = U_e I_e + U_b I_b \quad (\text{A.3})$$

and, therefore

$$\eta_t = \frac{Q_e (H_{ee} - H_{es}) + Q_a H_{ae} + U_e I_e + U_b I_b}{W_e} \quad (\text{A.4})$$

A.2 Plasma torch system

The plasma system energy efficiency is:

$$\eta_s = \frac{Q_a H_{as}}{W_e + \sum W_{aux}} \quad (\text{A.5})$$

and, therefore

$$\eta_s = \frac{Q_e (H_{ee} - H_{es}) + Q_a H_{ae} + U_e I_e + U_b I_b}{W_e + \sum W_{aux}} \quad (\text{A.6})$$

For a d.c. transferred arc plasma torch and *related* plasma torch system, the same formulae can be applied.

For an a.c. arc plasma torch and plasma torch system, the same formulas can be applied with electrical root mean square values.

Annex B (informative)

Human exposure to electromagnetic fields

B.1 Example of electromagnetic emission measurements on a d.c. non-transferred plasma torch under different operating conditions

Measurements of radiated electric field, from 1 kHz to 150 MHz, were performed on a d.c. non-transferred plasma torch fed by a thyristor power supply and operating:

- at high voltage (range from 1 000 V to 2 000 V as the mean value with fluctuations of $\pm 50\%$ at around 1 kHz);
- at different currents, in the range from 300 A to 1 000 A.

The measuring antenna was located at 2 m from the torch, perpendicularly to the direction of the plasma flow.

An electrical field exists within two frequency bands:

- from 3 kHz to 4 kHz: electric field from 1 V/m (at the arc voltage of 1 200 V and current of 750 A) to 3,6 V/m (at the arc voltage of 2 000 V and current of 750 A);
- from 1 MHz to 2 MHz: electric field from 0,01 V/m to 0,2 V/m (increases with the arc voltage and with the arc current).

NOTE V is the root mean square value.

B.2 Electromagnetic emissions threshold values around the torch system in operation

The minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from electromagnetic fields are specified in Directive 2004/40/CE. The threshold values, triggering corrective actions, are specified in Table 2 of the Directive.

The frequency range covered is from 0 Hz to 300 GHz. For the f frequency range from 1 MHz to 10 MHz, the limit values are as follows (f expressed in MHz):

- electric field strength E (V/m): $610/f$;
- magnetic field strength H (A/m): $1,6/f$;
- magnetic flux density B (μ T): $2/f$;
- contact current I_c (mA): 40.

Annex C (normative)

Standard energy efficiency definition of inductive plasma torch and torch system

The energy coupling efficiency is the quotient of the energy (power) coupled into the plasma in the discharge cavity to the total plate power supplied to the torch.

The overall energy efficiency is the quotient of the energy (power) coupled into the plasma in the discharge cavity to the total active energy (or power) supplied from the grid to the power supply.

The following parameters are to be taken into account:

| | |
|-----------|--|
| I_p | plate current of the RF power supply |
| V_p | plate voltage of the RF power supply |
| I_g | grid current of the RF power supply |
| Q_o | plasma gas mass flow rate |
| Q_{wt} | cooling liquid mass flow rate to the plasma torch and injection probe system |
| Q_{wr} | cooling liquid mass flow rate to the reactor downstream of the plasma torch |
| Q_{wp} | cooling liquid mass flow rate to the RF power generator |
| H_{we} | inlet enthalpy of cooling liquid |
| H_{wto} | enthalpy of cooling liquid at the exit of the torch and injection probe system |
| H_{wro} | enthalpy of cooling liquid at the exit of the reactor system |
| H_{wpo} | enthalpy of cooling liquid at the exit of the RF power supply |
| W_c | energy coupled electromagnetically into the plasma |
| W_{pp} | plate power of the RF power supply |
| W_{pg} | energy losses in the RF power supply |
| η_c | energy coupling efficiency of the induction plasma torch system |
| η_i | net energy efficiency of the induction plasma torch system |
| η_o | overall energy efficiency of the plasma torch power supply system |

Considering the torch as a closed system, the sum of enthalpies (in and out) of this system equals zero.

Energy coupled electromagnetically into the plasma torch is:

$$W_c = Q_{wt} \cdot (H_{wto} - H_{we}) + Q_{wr} \cdot (H_{wro} - H_{we}) \quad (C.1)$$

Plate power applied to the torch is:

$$W_{pp} = I_p V_p \quad (C.2)$$

Energy losses in the RF power supply are:

$$W_{pg} = Q_{wp} \cdot (H_{wpo} - H_{we}) \quad (C.3)$$

Energy coupling efficiency is:

$$\eta_c = W_c / W_{pp} \quad (C.4)$$

Net energy efficiency of the torch is:

$$\eta_i = Q_{wr} \cdot (H_{wro} - H_{we}) / W_c \quad (C.5)$$

Overall energy efficiency of the system is:

$$\eta_o = W_c / (W_c + W_{pg}) \quad (C.6)$$

Bibliography

IEC/TS 60519-5, *Safety in electroheat installations – Part 5: Specifications for safety in plasma installations*

IEC 60974-7, *Arc welding equipment – Part 7: Torches*

Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 *on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)*¹

¹ The Directive is available at <http://eur-lex.europa.eu/en/index.htm>

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| AVANT-PROPOS..... | 29 |
| 1 Domaine d'application et objet..... | 31 |
| 2 Références normatives..... | 31 |
| 3 Termes et définitions | 31 |
| 4 Types et conditions générales des essais..... | 35 |
| 4.1 Liste des essais et des mesures applicables aux systèmes torche plasma thermique..... | 35 |
| 4.1.1 Systèmes plasma d'arc..... | 35 |
| 4.1.2 Systèmes plasma inductif..... | 37 |
| 4.2 Liste des essais et des mesures applicables aux installations utilisant des torches plasma..... | 38 |
| 4.2.1 Installations de projection..... | 38 |
| 4.2.2 Installations électrochimiques et de chauffage des charges solide, liquide et gazeuse | 38 |
| 4.3 Conditions générales d'essai..... | 39 |
| 5 Description des méthodes d'essai et de mesure | 39 |
| 5.1 Essais applicables aux systèmes plasma | 39 |
| 5.1.1 Systèmes torche plasma d'arc | 39 |
| 5.1.2 Systèmes torche plasma inductif | 42 |
| 5.2 Essais applicables aux installations utilisant des torches plasma | 45 |
| 5.2.1 Installations ou équipements de projection | 45 |
| 5.2.2 Installations électrochimiques et de chauffage des charges solide, liquide et gazeuse | 46 |
| 6 Tables de référence | 47 |
| Annexe A (normative) Définition du rendement énergétique normalisé des torches plasma d'arc et des systèmes de torche plasma à courant continu..... | 48 |
| Annexe B (informative) Exposition humaine aux champs électromagnétiques | 50 |
| Annexe C (normative) Définition du rendement énergétique normalisé des torches plasma inductif et des systèmes de torche plasma..... | 51 |
| Bibliographie..... | 53 |

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MÉTHODES D'ESSAI DES ÉQUIPEMENTS PLASMA
POUR APPLICATIONS ÉLECTROTHERMIQUES
ET ÉLECTROCHIMIQUES**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités techniques de la CEI est de préparer des Normes Internationales. Dans certaines circonstances, un comité technique peut proposer la publication d'une spécification technique lorsque

- le contenu exigé ne peut être obtenu pour la publication d'une Norme internationale, en dépit des efforts répétés, ou
- lorsque le sujet est encore en cours de développement technique ou si, pour une quelconque autre raison, il existe la possibilité dans le futur mais pas à court terme d'un accord pour la réalisation d'une Norme internationale.

Les spécifications techniques sont soumises à révision après trois années d'existence afin de décider si elles peuvent être transformées en Normes internationales.

La CEI 60680 qui est une spécification technique, a été préparée par le comité d'études 27 de la CEI: Chauffage électrique industriel.

Cette première édition de la CEI 60680/TS annule et remplace la première édition de la Norme internationale CEI 60680 publiée en 1980. Elle constitue une révision technique.

Les modifications significatives par rapport à l'édition antérieure sont les suivantes:

- l'édition précédente traitait essentiellement des dispositifs de chauffage par arc et des applications de projection – cette TS s'applique à tous les moyens de production de plasma thermique, c'est-à-dire chauffage par arc et chauffage par induction, ainsi qu'à tous les équipements directement couplés à ces moyens de production;
- de nouveaux points/sujets ont été ajoutés:
 - des méthodes d'essai pour les systèmes de torche plasma inductif et pour les équipements de traitement thermo-chimique (4.1.2, 5.1.2, 4.2.2, 5.2.2);
 - de nouvelles méthodes d'essai pour les applications de projection (4.2.1.3, 5.2.1.2);
 - la protection contre les émissions électromagnétiques (y compris l'Annexe B);
 - les définitions détaillées du rendement, à la fois pour la torche d'arc et à induction et pour le système (Annexe A et Annexe C);
- les termes et définitions ont été mis à jour selon la deuxième édition de la CEI 60050-841.

Le texte de cette Spécification Technique est basé sur les documents suivants:

| Projet d'enquête | Rapport de vote |
|------------------|-----------------|
| 27/581/DTS | 27/605A/RVC |

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette spécification technique.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous « <http://webstore.iec.ch> » dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- transformée en une Norme Internationale,
- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

MÉTHODES D'ESSAI DES ÉQUIPEMENTS PLASMA POUR APPLICATIONS ÉLECTROTHERMIQUES ET ÉLECTROCHIMIQUES

1 Domaine d'application et objet

La présente spécification technique spécifie les méthodes d'essai applicables aux

- a) systèmes de torche plasma thermique:
 - systèmes plasma d'arc;
 - systèmes plasma inductif;
- b) installations utilisant des systèmes de torche plasma thermique:
 - équipement de projection;
 - équipement de traitement thermo-chimique et de chauffage des charges solide, liquide et gazeuse.

Les méthodes d'essai des torches plasma pour le soudage, la découpe et les techniques connexes sont spécifiées dans la CEI 60974-7.

La présente spécification a pour objet de normaliser les conditions et les méthodes d'essai des systèmes et des installations (ou des équipements) torche plasma thermique, utilisant un ou plusieurs systèmes de torche plasma thermique, afin d'en déterminer les principaux paramètres et les caractéristiques techniques.

Les essais spécifiés ne s'appliquent pas tous à chaque type d'équipement couvert par la présente spécification. Il est nécessaire de choisir les essais qui seront applicables à un système ou une installation de torche plasma spécifiés. Ce choix est effectif dans la présente spécification.

Les exigences de sécurité de systèmes et installations ou équipements spécifiés en a) et b) sont données dans la CEI/TS 60519-5.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. En ce qui concerne les références non datées, la dernière édition du document référencé s'applique (y compris tout amendement).

CEI 60050-841:2004, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 841: Electrothermie industrielle*

CEI 60398:1999, *Chauffage électrique industriel – Méthodes générales d'essai*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions fournis dans la norme CEI 60050-841 ainsi que les définitions suivantes s'appliquent.

3.1

plasma

tout gaz ionisé composé d'électrons libres, d'ions et de particules neutres (atomes et/ou molécules et/ou radicaux), électriquement neutre à l'échelle macroscopique et conducteur de l'électricité

[VEI 841-31-01, modifié]

3.2

plasma thermique

plasma en équilibre thermodynamique local, à environ la pression atmosphérique ou au delà

NOTE Dans les normes CEI relatives aux équipements ou installations, l'utilisation du seul mot «plasma» pour «plasma thermique» est tolérée.

[VEI 841-31-07]

3.3

chauffage par plasma

mode de chauffage utilisant le plasma thermique comme source de chaleur

[VEI 841-31-02]

3.4

plasma d'arc

plasma thermique d'arc

plasma thermique généré par une décharge électrique entre des électrodes dans un fluide

NOTE La colonne d'arc plasma étant caractérisée par une densité de courant élevée, jusqu'à 100 A/mm², sous des pressions du même ordre que la pression atmosphérique.

[VEI 841-31-10]

3.5

plasma inductif

plasma thermique dans lequel l'ionisation du gaz est obtenue par excitation dans un champ électromagnétique haute fréquence

[VEI 841-31-12, modifié]

3.6

gaz plasmagène

tout gaz, vapeur ou fluide devant être porté à l'état de plasma

[VEI 841-31-14]

3.7

torche plasma

équipement de chauffage électrique dans lequel un flux entrant de fluide est converti par l'apport d'énergie électrique en un écoulement plasma avant son éjection

[VEI 841-31-29, modifié]

3.8

torche plasma d'arc

équipement de chauffage électrique dans lequel un flux entrant de fluide est converti par l'apport d'énergie électrique provenant d'une décharge d'arc en un écoulement plasma avant son éjection

NOTE Les torches plasma d'arc peuvent être alimentées soit en courant électrique alternatif soit en courant électrique continu.

[VEI 841-31-30, modifié]

3.9

torche plasma d'arc transféré

torche plasma d'arc dans laquelle l'arc principal est établi entre une électrode constitutive de la torche et un milieu liquide ou solide (ou un matériau solide à traiter), conducteurs de l'électricité, constituant ou équipé d'une électrode externe de retour de courant

[VEI 841-31-32]

3.10

torche plasma d'arc non transféré

torche plasma d'arc dans laquelle l'arc principal est établi entre deux ou plusieurs électrodes constitutives de la torche

[VEI 841-31-31]

3.11

jet de plasma

écoulement de plasma à haute vitesse délivré par une torche plasma d'arc non transféré ou par une torche plasma d'induction

[VEI 841-31-18]

3.12

torche plasma sans électrode

torche plasma ne comportant pas d'électrode et alimentée par une source alternative à haute fréquence de type inductif ou capacitif

[VEI 841-31-36]

3.13

torche plasma inductif

torche plasma dans laquelle l'écoulement du plasma est généré par un champ magnétique alternatif produit par un courant à haute fréquence circulant dans une bobine

[VEI 841-31-38, modifié]

3.14

amorçage d'une torche plasma

début du changement d'état du gaz plasmagène, de l'état non ionisé à l'état plasma, provoqué par un dispositif de démarrage

[VEI 841-31-15]

3.15

dispositif d'amorçage à haute fréquence (d'une torche plasma)

dispositif utilisé dans une torche plasma d'arc pour amorcer l'arc au moyen d'une décharge électrique à haute tension et haute fréquence entre les électrodes

[VEI 841-31-16, modifié]

3.16

dispositif d'amorçage en court-circuit (d'une torche plasma)

dispositif utilisé dans une torche plasma d'arc pour amorcer l'arc au moyen d'un court-circuit entre les électrodes

[VEI 841-31-17]

3.17

tuyère (d'une torche plasma)

partie d'une torche plasma permettant de mettre en forme l'écoulement du plasma pour en accroître la vitesse et/ou la densité d'énergie

[VEI 841-31-40, modifié]

3.18

cathode (d'une torche plasma d'arc non transféré ou transféré)

électrode négative d'une torche plasma d'arc en courant continu

NOTE 1 La cathode peut être constituée d'un matériau à forte conductivité électrique et thermique, tel que le cuivre, ou un métal réfractaire ou refroidi à l'eau, tel que le tungstène, refroidi à l'eau si nécessaire.

NOTE 2 Dans une torche plasma d'arc transféré, l'électrode de retour de courant joue parfois le rôle de cathode.

[VEI 841-31-42]

3.19

anode (d'une torche plasma d'arc non transféré ou transféré)

électrode positive d'une torche plasma d'arc en courant continu

NOTE 1 L'anode est habituellement constituée d'un matériau à forte conductivité électrique et thermique, tel que le cuivre, et refroidie à l'eau.

NOTE 2 Dans une torche plasma d'arc transféré, l'électrode de retour de courant joue le plus souvent le rôle d'anode.

NOTE 3 Dans une torche plasma d'arc non transféré, l'anode est souvent la tuyère de la torche.

[VEI 841-31-41]

3.20

fonctionnement normal d'une torche plasma

fonctionnement caractérisé par des conditions opératoires reproductibles définies par le type et la composition du gaz plasmagène, son débit massique et le courant d'arc

3.21

courant spécifié d'une torche plasma

courant maximal pouvant être utilisé (pour un gaz plasmagène donné) dans une torche plasma

3.22

puissance spécifiée d'une torche plasma

puissance maximale pouvant être développée (pour un gaz plasmagène donné) dans une torche plasma

3.23

puissance thermique d'une torche plasma

puissance thermique délivrée par la torche, définie comme le débit massique du gaz plasmagène multiplié par son enthalpie moyenne

3.24

rendement énergétique d'une torche plasma

rapport de la puissance thermique délivrée à la puissance active d'entrée

3.25

température du plasma

température locale instantanée dans un plasma

[VEI 841-31-45]

3.26**enthalpie moyenne du plasma**

quotient de la puissance délivrée par la torche plasma par le débit massique de gaz plasmagène

[VEI 841-31-44]

3.27**système plasma**

équipement destiné à la production de plasma thermique, comprenant la torche plasma, son alimentation électrique de puissance, les servitudes d'alimentation en gaz et de refroidissement ainsi qu'une unité de commande

3.28**four plasma**

équipement comprenant une enceinte recouverte de matériau réfractaire dans lequel une charge est chauffée par une ou plusieurs torches plasma, et qui est généralement utilisé pour la fusion ou la réduction de matériaux à hautes températures

[VEI 841-31-25]

3.29**réacteur plasma**

équipement de chauffage électrique comportant une enceinte de traitement thermo-chimique de matériaux par torches plasma

[VEI 841-31-27]

3.30**installation plasma**

installation destinée à utiliser la technique du plasma, comprenant un système plasma et, dans la plupart des cas un four ou un réacteur plasma, y compris tous les matériels auxiliaires nécessaires pour le chauffage ou le traitement thermique de matériaux

3.31**projection plasma**

procédé de revêtement dans lequel un matériau introduit sous forme de poudre ou de fil, fondu dans un jet de plasma, est projeté sur une surface

[VEI 841-31-24]

3.32**rendement de la projection poudre**

rapport du débit massique de poudre déposée sur un substrat au débit massique de poudre injecté dans la torche

4 Types et conditions générales des essais**4.1 Liste des essais et des mesures applicables aux systèmes torche plasma thermique****4.1.1 Systèmes plasma d'arc**

Les systèmes plasma d'arc doivent être soumis aux mesures et aux essais suivants.

4.1.1.1 Essais des alimentations électriques d'arc

Les alimentations utilisées pour la génération du plasma d'arc sont généralement soit en courant alternatif à 50 Hz ou 60 Hz, soit en courant continu au moyen de dispositifs à

semiconducteurs, par exemple des thyristors, IGBT (transistor bipolaire à grille isolée) ou IGCT (thyristor commuté à grille intégrée).

Pour les alimentations en courant alternatif ou en courant continu, les essais suivants s'appliquent:

- a) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
- b) mesure de la résistance d'isolement;
- c) essai diélectrique;
- d) essai en mode régulation:
 - essai à vide,
 - essai en charge;
- e) détermination du rendement énergétique;

Pour l'alimentation en courant continu seulement:

- f) mesure du taux d'ondulation.

4.1.1.2 Essais des circuits d'alimentation en gaz

Les caractéristiques de débit/pression du circuit de gaz doivent être déterminées.

4.1.1.3 Essais du circuit de refroidissement

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) détermination des caractéristiques de débit/pression;
- b) mesure de la température du liquide de refroidissement à l'entrée et en sortie en fonction du débit massique, le système plasma étant en régime établi à sa puissance maximale;
- c) mesure de la résistivité électrique du liquide de refroidissement.

4.1.1.4 Essai d'amorçage

Dans le cas de systèmes plasma amorcés par un dispositif à haute fréquence, des mesures d'émissions électromagnétiques autour du dispositif d'amorçage doivent être réalisées selon les réglementations en vigueur dans le pays dans lequel le système plasma est prévu d'être installé. Elles doivent satisfaire aux réglementations locales.

4.1.1.5 Essais des torches plasma

Les essais normalisés suivants sont réalisés dans le cas où la torche fonctionne dans un environnement atmosphérique ambiant:

- a) essai d'étanchéité statique en phase de remplissage du liquide de refroidissement;
- b) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
- c) mesure de la résistance d'isolement;
- d) essai diélectrique;
- e) essai d'amorçage:
 - dispositif d'amorçage à haute fréquence:
 - vérification de l'aptitude à l'amorçage avec le ou les gaz plasmagène(s) devant être utilisé(s),
 - dispositif d'amorçage en court-circuit:
 - continuité électrique,
 - vérification de l'aptitude à l'amorçage avec le ou les gaz plasmagène(s) devant être utilisé(s);

- f) détermination des caractéristiques tension/courant pour plusieurs débits de gaz plasmagène, pour chaque gaz plasmagène spécifié;
- g) détermination de la puissance thermique et de la puissance électrique dans différentes conditions de fonctionnement;
- h) détermination de l'enthalpie moyenne dans différentes conditions de fonctionnement;
- i) détermination du rendement énergétique;
- j) mesure de la température des parties accessibles de la torche;
- k) mesure du niveau de bruit acoustique dans différentes conditions de fonctionnement;
- l) mesure des émissions électromagnétiques dans différentes conditions de fonctionnement, selon les normes appropriées;
- m) dans le cas d'une torche plasma d'arc transféré, mesure du rayonnement thermique dans différentes conditions de fonctionnement;
- n) mesure de l'usure des électrodes.

NOTE Ce type de mesures n'est pas obligatoire et résulte d'un accord entre le fabricant et l'utilisateur.

4.1.2 Systèmes plasma inductif

Les systèmes plasma inductif doivent être soumis aux mesures et aux essais suivants.

4.1.2.1 Essais des alimentations électriques à haute fréquence

Les alimentations utilisées pour la génération de plasma inductif radiofréquence sont généralement dans la gamme haute fréquence MHz (et plus couramment entre 2 MHz et 27,6 MHz). Exceptionnellement, cette gamme est étendue vers le bas à la gamme 200 kHz à 300 kHz et vers le haut jusqu'à 40 MHz. Les alimentations fonctionnant dans le domaine des hautes fréquences MHz à des niveaux de puissance de plusieurs dizaines à centaines de kW comprennent généralement un circuit oscillant à triode.

Les essais suivants s'appliquent:

- a) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
- b) mesure de la résistance d'isolement;
- c) essai du circuit de protection;
- d) détermination du rendement énergétique.

4.1.2.2 Essais des circuits de gaz

Voir 4.1.1.2.

4.1.2.3 Essais du circuit de refroidissement

Voir 4.1.1.3.

4.1.2.4 Essai d'amorçage

Voir 4.1.1.4.

4.1.2.5 Essais des torches plasma

Appliquer 4.1.1.5, à l'exception de n) (torche sans électrode).

4.2 Liste des essais et des mesures applicables aux installations utilisant des torches plasma

4.2.1 Installations de projection

Les installations de projection doivent être soumis aux mesures et aux essais suivants.

4.2.1.1 Systèmes torche plasma d'arc

Voir 4.1.1 pour les systèmes plasma d'arc.

4.2.1.2 Systèmes plasma inductif

Voir 4.1.2 pour les systèmes plasma inductif.

4.2.1.3 Essais et mesures des équipements de projection plasma

Dans les applications de projection, le matériau de traitement est de la poudre, un fil fusible ou un liquide. Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) pour un fonctionnement utilisant de la poudre d'apport:
 - 1) détermination de la gamme de dimensions des particules,
 - 2) détermination de la fluidité du flux entrant de particules,
 - 3) détermination des caractéristiques débit massique/pression du circuit de gaz porteur,
 - 4) détermination du débit maximal injecté en fonction de la puissance maximale de l'équipement,
 - 5) détermination du rendement de la projection à poudre (3.32);
- b) pour un fonctionnement utilisant un fil d'apport:
 - 1) détermination du diamètre du fil,
 - 2) détermination du débit maximal injecté en fonction de la puissance maximale de l'équipement;
- c) pour un fonctionnement utilisant un liquide d'apport:
 - 1) système d'injection:
 - caractérisation de la pulvérisation,
 - caractérisation de l'injection mécanique (gouttes ou jets);
 - 2) solutions:
 - concentration du précurseur et composition,
 - solvant utilisé;
 - 3) suspension:
 - solvant utilisé,
 - dispersant utilisé,
 - détermination de la taille des particules et morphologie,
 - détermination du pourcentage en masse des particules.

La pièce à traiter doit être mise à la terre lors d'un traitement par plasma d'arc transféré.

4.2.2 Installations électrochimiques et de chauffage des charges solide, liquide et gazeuse

Les installations électrochimiques et de chauffage des charges solide, liquide et gazeuse doivent être soumises aux essais et mesures suivants.

4.2.2.1 Systèmes torche plasma thermique

Voir 4.1.1 et 4.1.2.

Le point b) de 4.1.1.3 doit prendre en compte les pertes supplémentaires dans le circuit de refroidissement de la torche plasma, dues à la présence en partie ou en totalité, de la torche dans l'atmosphère à température élevée du four ou du réacteur.

4.2.2.2 Equipement de traitement thermochimique et de chauffage

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) détermination des caractéristiques de pression/température du circuit de gaz, y compris le ou les gaz utilisés pour la torche, dans différentes conditions de fonctionnement;
- b) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
- c) mesure du niveau de bruit acoustique;
- d) mesure de la température des parties accessibles de l'équipement (en particulier le four et/ou le réacteur);
- e) identification des risques liés à la production de produits toxiques;
- f) identification des situations de danger d'explosion;
- g) mesure de la température du liquide de refroidissement en entrée et en sortie en fonction du débit massique, l'équipement étant en régime établi à sa puissance maximale;
- h) détermination des caractéristiques débit massique/pression du circuit de refroidissement.

4.3 Conditions générales d'essai

Les conditions générales d'essai de la norme CEI 60398 s'appliquent.

5 Description des méthodes d'essai et de mesure

5.1 Essais applicables aux systèmes plasma

5.1.1 Systèmes torche plasma d'arc

5.1.1.1 Essais des alimentations électriques d'arc

Pour les systèmes en courant alternatif et en courant continu, les essais et les mesures suivants s'appliquent:

- a) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
on doit appliquer un courant de 10 A pour mesurer la continuité de masse, en $m\Omega$;
- b) mesure de la résistance d'isolement:
on doit appliquer aux circuits basse tension une tension continue de 500 V pendant 1 min sans observer de claquage sur ces circuits;
on doit appliquer aux circuits haute tension une tension continue de 1 000 V pendant 1 min sans observer de claquage sur ces circuits;
pour les circuits à basse tension, la résistance d'isolement ne doit pas être inférieure à $3 M\Omega$;
pour les circuits à haute tension, la résistance d'isolement ne doit pas être inférieure à $100 M\Omega$;
- c) essai diélectrique:
on applique une tension pratiquement sinusoïdale à la fréquence du réseau 50 Hz ou 60 Hz, dont la valeur est spécifiée ci-dessous, pendant 1 min;

au début de l'essai, la valeur de la tension appliquée est inférieure à la moitié de la valeur prescrite, puis elle est augmentée rapidement jusqu'à atteindre la valeur d'essai.

Les valeurs d'essai sont les suivantes:

- installation de tension assignée inférieure ou égale à 50 V; tension d'essai: 500 V;
- installation de tension assignée U supérieure à 50 V; tension d'essai $2U + 1\,000$ V (minimum 1 500 V);

d) essais en mode régulation:

- mesure de la tension à vide;
- essais en charge:
 - essais en court-circuit,
 - essais sur charge résistive (valeur de la résistance inférieure à $1\ \Omega$) afin de déterminer la précision du courant;

e) détermination du rendement énergétique;

mesure des pertes énergétiques à basse tension et aux courants de fonctionnement, afin de déterminer le rendement énergétique par la mesure des puissances d'entrée et de sortie aux conditions nominales telles que spécifiées.

Pour les systèmes à courant continu, la mesure suivante s'applique:

f) mesure du taux d'ondulation:

la mesure de l'ondulation de courant est réalisée à la puissance spécifiée (selon accord entre le fabricant et l'utilisateur) avec une charge résistive.

NOTE Le taux d'ondulation est défini comme la valeur efficace de l'ondulation à la valeur moyenne en courant continu du courant mesuré.

5.1.1.2 Essais des circuits de gaz

Les caractéristiques de débit/pression du circuit de gaz doivent être déterminées dans le domaine de pression spécifié par le fabricant.

Le débit de gaz est généralement exprimé en Nm^3/h ou en NI/min . La pression du gaz, en tête du circuit de distribution de gaz à la torche doit être mesurée au moyen d'un capteur de pression. Le débit doit être mesuré avec un débitmètre afin d'obtenir le débit massique du gaz plasmagène, en amont de la torche.

5.1.1.3 Essais du circuit de refroidissement

Les essais et mesures suivants sont applicables:

a) détermination des caractéristiques de débit/pression;

Le débit massique du liquide de refroidissement, fréquemment de l'eau, est donnée en m^3/h . Les caractéristiques de débit/pression seront mesurées en simulant la perte de charge de la torche au moyen d'un débitmètre à la sortie du dispositif de simulation et de deux capteurs de pression situés des deux côtés du dispositif, y compris toutes les conduites;

b) mesure de la température du liquide de refroidissement à l'entrée et en sortie en fonction du débit massique, le système plasma étant en régime établi à sa puissance maximale;

La différence de température de l'eau de refroidissement doit être mesurée aux bornes de la torche, y compris tous les tuyaux flexibles. Si des capteurs thermoélectriques tels que des thermistances sont utilisés, ils doivent être électriquement isolés du liquide de refroidissement. Les mesures doivent être réalisées au débit massique et à la pression recommandés par le fabricant de la torche. Une fois réalisées les mesures de températures et de débit massique, on peut calculer les pertes de la torche.

c) mesure de la résistivité électrique du liquide de refroidissement;

La résistivité du liquide de refroidissement est généralement exprimée en $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$. On doit mesurer la résistivité en tête du circuit de refroidissement pressurisé à la température maximale. Il convient d'utiliser de l'eau déminéralisée lorsque c'est approprié.

5.1.1.4 Mesures du circuit d'amorçage à haute-fréquence

Les mesures des émissions électromagnétiques s'appliquent pour la protection du personnel.

Les mesures sont réalisées selon les réglementations en vigueur dans le pays dans lequel le système plasma est prévu être installé. Elles doivent satisfaire aux réglementations locales.

5.1.1.5 Caractéristiques des torches plasma

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) essai d'étanchéité statique en phase de remplissage du liquide de refroidissement;
La torche, avec tous ses orifices obturés, doit être pressurisée avec le liquide de refroidissement à la pression statique spécifiée par le fabricant pendant 5 min. Aucune fuite ne doit se produire.
- b) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
Voir 5.1.1.1, a).
- c) mesure de la résistance d'isolement;
Voir 5.1.1.1, b).
- d) essai diélectrique;
Voir 5.1.1.1, c).
- e) essai d'amorçage;

Les conditions d'amorçage, dépendant du type de dispositif d'amorçage doivent être déterminées selon les mesures et les essais suivants:

- pour un dispositif d'amorçage à haute fréquence

- aptitude à la commande de l'amorçage

Après avoir raccordé le circuit d'amorçage à la torche plasma, et en conformité avec les spécifications du fabricant, on règle le débit massique du gaz plasmagène (choisi) afin de produire l'étincelle à haute fréquence nécessaire pour amorcer l'arc principal, ensuite entretenu par le courant d'arc.

NOTE Dans certains torches particulières, la distance inter électrodes est aussi réglable, fournissant ainsi un autre moyen d'ajustement des conditions de démarrage.

- pour un dispositif d'amorçage en court-circuit

- mesure de la continuité de masse

On amorce l'arc par un court-circuit initial entre les électrodes principales, soit par un dispositif auxiliaire ajustable soit par des électrodes principales ajustables; le court-circuit est vérifié avec un ohmmètre.

- aptitude à la commande de l'amorçage

Le courant d'arc principal, de valeur spécifiée par le fabricant de la torche, est fourni aux électrodes principales au travers du court-circuit pendant une courte durée (moins de 1 s); puis le dispositif auxiliaire ou les électrodes principales sont ensuite déplacés jusqu'à leur positions nominales pour permettre le développement de l'arc principal dans l'écoulement de gaz plasmagène (choisi), dont le débit massique est alors réglé pour entretenir l'arc.

- f) détermination des caractéristiques tension/courant d'arc pour différentes conditions de fonctionnement, pour chaque gaz plasmagène spécifié;

Les caractéristiques tension/courant d'arc sont mesurées pour plusieurs débits massiques de gaz plasmagènes, chaque caractéristique étant établie à débit massique constant, dans la totalité du domaine des valeurs spécifiées par le fabricant.

NOTE Pour l'arc transféré, les caractéristiques sont déterminées pour une distance donnée entre la torche et la pièce à travailler.

- g) détermination de la puissance thermique et de la puissance électrique;

La puissance électrique est la puissance active fournie à la torche, en kW, mesurée aux bornes de la ou des alimentation(s) électrique(s) au moyen des appareils de mesure appropriés fournis par le fabricant. La puissance thermique est la puissance délivrée par la torche, en kW, principalement considérée comme la différence entre la puissance électrique fournie à la torche et les pertes dans le circuit de refroidissement; une définition plus précise est présentée dans l'Annexe A avec les calculs relatifs au rendement énergétique de la torche.

- h) détermination de l'enthalpie moyenne pour différentes conditions de fonctionnement;

L'enthalpie moyenne, en joules/kg de gaz, est déterminée comme le rapport de la puissance thermique au débit massique du gaz plasmagène. Toutefois, cette mesure n'est généralement pas obligatoire pour les applications de projection.

- i) détermination du rendement énergétique;

Le rendement énergétique est le rapport de la puissance thermique délivrée par la torche à la puissance électrique active fournie à la torche; pour une description plus précise, voir Annexe A.

- j) mesure de la température des parties accessibles de la torche plasma;

La température de surface en différents points des parties accessibles de la torche doit être mesurée lorsque les conditions de régime établi à la puissance maximale en continu de la torche ont été atteintes au cours du fonctionnement, par toute méthode conventionnelle.

- k) mesure du niveau de bruit acoustique;

Cette mesure doit satisfaire aux réglementations en vigueur dans le pays où l'équipement est prévu être installé.

- l) mesures des émissions électromagnétiques dans différentes conditions de fonctionnement selon les normes appropriées; des exemples sont disponibles à l'Annexe B;

- m) mesure du rayonnement thermique dans différentes conditions de fonctionnement;

La torche d'arc transféré rayonne de l'énergie à partir de l'arc à très haute température. Le flux de chaleur doit être mesuré par un radiomètre.

- n) mesure de l'usure des électrodes.

L'usure de l'électrode (et de la tuyère quand elle est utilisée comme électrode) peut être exprimée en perte de masse de métal (grammes) par unité de temps (heure) dans les conditions établies ayant fait l'objet d'un accord entre le fabricant et l'utilisateur. Elle doit être déterminée en pesant les électrodes et en mesurant la durée de fonctionnement correspondante. Pour les applications de projection, la compensation de l'usure de l'électrode est importante pour conserver la qualité du revêtement.

5.1.2 Systèmes torche plasma inductif

5.1.2.1 Essais des alimentations inductives

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) vérification de la liaison équipotentielle par mesure:

– on doit appliquer un courant de 10 A pour mesurer la continuité de masse, en mΩ;

- b) mesure de la résistance d'isolement:

– on doit appliquer aux circuits basse tension une tension continue de 500 V pendant 1 min sans observer de claquage sur ces circuits;

- on doit appliquer aux circuits haute tension une tension continue de 1000 V pendant 1 min sans observer de claquage sur ces circuits;
 - pour les circuits à basse tension, la résistance d'isolement ne doit pas être inférieure à 3 M Ω ;
 - pour les circuits à haute tension, la résistance d'isolement ne doit pas être inférieure à 100 M Ω ;
- c) essais du circuit de protection:
- essais et mesures en surcharge du courant de déclenchement plaque et du courant de grille;
 - les verrouillages de l'interrupteur porte et de l'enceinte de la torche (cage de Faraday) doivent déconnecter le disjoncteur de l'alimentation électrique;
- d) détermination du rendement énergétique:
- mesure des pertes de l'alimentation électrique dans des conditions opératoires de puissance faible, moyenne et élevée, en présence d'une charge calorimétrique et de conditions plasma.

5.1.2.2 Essais des circuits de gaz

Les caractéristiques de débit/pression du circuit de gaz doivent être déterminées.

Le débit de gaz est généralement exprimé en Nm³/h ou en NI/min. Le rapport de la pression de gaz au débit doit être déterminé au moyen d'un capteur de pression installé à l'entrée de la torche, y compris les conduites, et d'un débitmètre inséré dans le circuit en amont du capteur de pression. Les mesures sont de préférence réalisées sur une torche fonctionnant avec les débits de gaz recommandés par le fabricant.

5.1.2.3 Caractéristiques du circuit de refroidissement

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) détermination des caractéristiques débit/pression:
- le débit massique du liquide de refroidissement, généralement de l'eau, est exprimé en m³/h ou en l/min. Le capteur de pression doit être placé à l'entrée du réseau de canalisations de refroidissement de la torche, y compris toutes les conduites. Le débit doit être mesuré soit volumétriquement soit au moyen d'un débitmètre inséré dans le circuit de refroidissement en aval de la torche;
- b) mesure de la température du liquide de refroidissement en entrée et en sortie en fonction du débit massique, le système plasma étant en régime établi à sa puissance maximale:
- la différence de température de l'eau de refroidissement doit être mesurée aussi près que possible de la torche, y compris les tuyaux flexibles. Si des capteurs thermoélectriques tels que des thermocouples ou des thermistances sont utilisés, ils doivent être électriquement isolés du liquide de refroidissement. Les mesures doivent être réalisées au débit massique et à la pression recommandés par le fabricant de la torche;
 - une fois réalisées les mesures de températures et de débit massique, on peut calculer les pertes calorimétriques de la torche, en kW;
- c) mesure de la résistivité électrique du liquide de refroidissement:
- la résistivité du liquide de refroidissement est exprimée en $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$;
- d) essai d'amorçage:
- Voir 5.1.1.4.

5.1.2.4 Essais et mesures des torches plasma

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) essai d'étanchéité statique en phase de remplissage du liquide de refroidissement:
- la torche, avec tous ses orifices obturés, doit être pressurisée avec le liquide de refroidissement à la pression statique spécifiée par le fabricant pendant 5 min. Aucune fuite ne doit se produire;
- b) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
Voir 5.1.2.1, a).
- c) mesure de la résistance d'isolement;
Voir 5.1.2.1, b).
- d) essai d'amorçage:
- vérification de l'aptitude à l'amorçage du dispositif d'amorçage à haute fréquence
après avoir raccordé le circuit d'amorçage à la torche plasma, et en conformité avec les spécifications du fabricant, on règle le débit massique du gaz plasmagène (choisi) et la pression afin de produire l'étincelle à haute fréquence nécessaire pour amorcer la décharge plasma, laquelle est ensuite entretenue par le flux magnétique;
 - amorçage par la tige de décharge
la tige de décharge doit être correctement isolée de la terre ou de l'opérateur. La mesure de l'isolement électrique par rapport à la terre doit être réalisée avec un ohmmètre;
 - auto-amorçage sous vide
mesure de la tension plaque, de la fréquence et de la pression nécessaires pour un amorçage correct du plasma sous atmosphère argon;
la tension, la fréquence et la pression doivent être à l'intérieur des domaines de valeurs spécifiés par le fabricant;
- e) détermination des caractéristiques tension/courant plaque dans différentes conditions de fonctionnement
les caractéristiques tension/courant plaque sont mesurées pour plusieurs débits massiques et pressions de gaz plasmagènes, chaque caractéristique étant établie à débit massique constant, dans la totalité du domaine des valeurs spécifiées par le fabricant;
- f) détermination de la puissance thermique et de la puissance électrique
la puissance électrique est la puissance plaque en courant continu fournie au tube oscillateur, en kW, mesurée avant la triode RF dans la ou les alimentations électriques au moyen d'appareils de mesure appropriés fournis par le fabricant de l'alimentation RF. Cette puissance plaque inclut la puissance délivrée aux bornes de la torche et les pertes dans la triode et le circuit du générateur RF;
la puissance thermique est la puissance délivrée par la torche, en kW, principalement considérée comme la différence entre la puissance électrique plaque et les pertes dans le circuit de refroidissement de la torche, et la triode du générateur RF et le circuit de résonance. Une définition plus précise est présentée dans l'Annexe C avec les calculs relatifs au rendement énergétique de la torche;
- g) détermination de l'enthalpie moyenne dans différentes conditions de fonctionnement
l'enthalpie moyenne, en joules/kg de gaz, est déterminée comme le rapport de la puissance thermique au débit massique du gaz plasmagène;
- h) détermination du rendement énergétique
le rendement énergétique est le rapport de la puissance thermique délivrée par la torche à la puissance électrique active fournie à la torche; pour une définition plus précise, voir Annexe C;
- i) mesure du niveau de bruit acoustique
la mesure doit satisfaire aux réglementations en vigueur dans le pays où l'équipement est prévu être installé;

- j) mesures des émissions électromagnétiques dans différentes conditions de fonctionnement, en plusieurs endroits à proximité de la torche en fonctionnement avec la cage de Faraday entourant la torche fermée (voir aussi l'Annexe B);

les mesures des champs électrique et magnétique rayonnés doivent être réalisés sur un système torche plasma inductif alimenté par une alimentation RF et fonctionnant à la fréquence nominale et à la puissance maximale assignée du système. Il convient que les mesures soient réalisées pour le domaine de fréquences de fonctionnement nominal. Le fabricant peut limiter les mesures à chaque configuration générique du système;

il convient que l'antenne de mesure soit située où se tient l'opérateur principal et à 10 m de la torche, perpendiculairement à la direction du flux de plasma dans les quatre directions cardinales;

- k) mesure du rayonnement visible dans différentes conditions de fonctionnement

Elle ne s'applique pas si la décharge plasma est confinée dans une zone d'accès limité.

5.2 Essais applicables aux installations utilisant des torches plasma

5.2.1 Installations ou équipements de projection

5.2.1.1 Systèmes de torches plasma

Voir 5.1.1 et 5.1.2.

5.2.1.2 Equipement de projection

Les mesures et essais suivants s'appliquent lorsqu'on utilise de la poudre ou du fil comme matériau de traitement:

- a) pour un fonctionnement utilisant de la poudre:

- 1) détermination du domaine de dimensions des particules,

On doit utiliser des tamis de type normalisé. Le maillage est habituellement donné en micromètres.

- 2) détermination de la fluidité du flux entrant de particules,

Elle est déterminée comme le quotient de la quantité de poudre et du temps d'écoulement à travers un orifice calibré (par exemple de diamètre 3 mm et de longueur 5 mm).

- 3) détermination des caractéristiques débit massique/pression du circuit de gaz porteur,

L'essai doit être réalisé en utilisant la poudre pour une application spécifique. Le débit de gaz porteur doit être ajusté aux conditions de fonctionnement de la torche, à la position et à l'inclinaison de l'injection tout autant qu'à la granulométrie de la poudre, à sa masse volumique et à sa morphologie. Le capteur de pression doit être inséré en amont du système d'alimentation en poudre et le débitmètre en amont du capteur de pression.

- 4) détermination du rendement de dépôt,

Il convient de mesurer le rendement de dépôt, pour la poudre à projeter, dans les conditions de fonctionnement de la torche, pour une position et une inclinaison données de l'injecteur. Ceci peut être réalisé, par exemple, en utilisant un substrat en alliage d'aluminium dont la taille est au moins six à dix fois celle de la tâche de dépôt;

- b) pour un fonctionnement utilisant un fil d'apport:

- 1) détermination du diamètre,

Le diamètre du fil d'apport doit être mesuré par les moyens conventionnels dans les limites autorisées, telles que spécifiées par le fabricant de la torche.

- 2) détermination du débit maximal injecté en fonction de la puissance maximale de l'équipement.

Cet essai doit être réalisé en utilisant le fil projeté du diamètre spécifié par le fabricant de la torche.

5.2.2 Installations électrochimiques et de chauffage des charges solide, liquide et gazeuse

5.2.2.1 Systèmes de torches plasma

Voir 5.1.1 et 5.1.2.

5.2.2.2 Equipement de traitement thermochimique et de chauffage

Les essais et mesures suivants sont applicables:

- a) détermination des caractéristiques de pression/température du circuit de gaz, y compris le gaz utilisé pour la torche;
La pression et la température doivent être mesurées de façon continue dans le four (ou le réacteur) ou dans la conduite d'évacuation à proximité du four (ou du réacteur).
- b) vérification de la liaison équipotentielle par mesure;
Voir 5.1.1.1, a)
- c) mesure du niveau de bruit acoustique;
Le niveau de bruit doit être mesuré en conformité avec les réglementations en vigueur dans le pays dans lequel le four ou le réacteur est prévu être installé.
- d) mesure de la température des parties accessibles du four ou du réacteur;
Cette mesure doit être réalisée au cours d'un fonctionnement normal du four ou du réacteur, à la puissance maximale en continu, en utilisant à la fois des méthodes de mesure de température de surface conventionnelle et optique en différents points dans des conditions de fonctionnement en régime établi.
- e) analyse de risques liée à l'éventuelle production de produits toxiques, en conformité avec les réglementations de sécurité en vigueur dans le pays dans lequel le four (ou le réacteur) est prévu être installé et mis en fonction;
- f) analyse de risques liée aux situations de danger d'explosion, en conformité avec les réglementations de sécurité en vigueur dans le pays dans lequel le four (ou le réacteur) est prévu être installé et mis en fonction;
- g) mesure de la température du liquide de refroidissement en entrée et en sortie en fonction du débit massique, l'équipement étant en régime établi à sa puissance maximale;
La différence de température du liquide de refroidissement doit être mesurée en entrée et en sortie des bornes de chacun des éléments de l'équipement, y compris les conduites. Si des capteurs thermoélectriques tels que des thermocouples ou des thermistances sont utilisés, ils doivent être électriquement isolés du liquide de refroidissement. Les mesures doivent être réalisées au débit massique et à la pression recommandés par le fabricant de l'équipement.
- h) détermination des caractéristiques débit massique/pression du circuit de refroidissement.
Le capteur de pression et le débitmètre doivent être placés sur ou en sortie de l'équipement à refroidir.

6 Tables de référence

Pour certaines applications, il doit être possible de corréler les performances de la torche avec les tables de référence à haute température (ou enthalpie). Par exemples, les diagrammes de Mollier et les planches de composition chimique des plasma, établis au cas par cas pour chaque gaz plasmagène utilisé, sont généralement employés lorsqu'ils sont disponibles, ou calculés pour chaque gaz plasmagène.

Les tables de référence, quand elles sont utilisées, doivent être signalées selon accord entre le fabricant et l'utilisateur.

Annexe A (normative)

Définition du rendement énergétique normalisé des torches plasma d'arc et des systèmes de torche plasma à courant continu

A.1 Torche plasma

Le rendement énergétique (voir 3.24) est le rapport de l'énergie (ou de la puissance) contenue dans le gaz plasmagène sortant de la torche à l'énergie active totale (ou la puissance) fournie à la torche.

Le rendement énergétique normalisé est mesuré par rapport au flux de plasma évacué à l'atmosphère extérieure.

Les paramètres suivants sont à prendre en compte:

| | |
|------------------|--|
| U_e | tension d'arc |
| I_e | courant d'arc |
| U_b | tension de la bobine magnétique |
| I_b | courant dans la bobine magnétique |
| Q_a | débit massique du gaz plasmagène |
| H_{ae} | enthalpie du gaz plasmagène à l'entrée |
| Q_e | débit massique du liquide de refroidissement |
| H_{ee} | enthalpie du liquide de refroidissement à l'entrée |
| H_{es} | enthalpie du liquide de refroidissement en sortie |
| H_{as} | enthalpie du gaz plasmagène en sortie (enthalpie du gaz délivré par la torche) |
| ΣW_{aux} | puissance fournie aux auxiliaires du système plasma |
| W_e | puissance fournie à la torche |
| η_t | rendement énergétique de la torche |
| η_s | rendement énergétique du système |

Considérant la torche comme un système fermé, la somme des enthalpies (interne et externe) de ce système est égale à 0.

NOTE 1 La torche est refroidie, de sorte que l'énergie transmise à l'atmosphère extérieure est égale à 0.

NOTE 2 L'équation suivante prend en compte l'énergie dissipée dans une bobine magnétique alimentée séparément (de l'arc principal) et correspondant à un modèle de torche largement utilisé. Pour le cas sans bobine magnétique, le terme $U_b I_b$ est égal à 0.

Le rendement énergétique de la torche plasma est:

$$\eta_t = \frac{Q_a H_{as}}{W_e} \quad (\text{A.1})$$

où

$$Q_a H_{as} = Q_e (H_{ee} - H_{es}) + Q_a H_{ae} + U_e I_e + U_b I_b \quad (\text{A.2})$$

$$W_e = U_e I_e + U_b I_b \quad (\text{A.3})$$

et, de ce fait

$$\eta_t = \frac{Q_e (H_{ee} - H_{es}) + Q_a H_{ae} + U_e I_e + U_b I_b}{W_e} \quad (\text{A.4})$$

A.2 Système torche plasma

Le rendement énergétique du système plasma est:

$$\eta_s = \frac{Q_a H_{as}}{W_e + \sum W_{aux}} \quad (\text{A.5})$$

et, de ce fait

$$\eta_s = \frac{Q_e (H_{ee} - H_{es}) + Q_a H_{ae} + U_e I_e + U_b I_b}{W_e + \sum W_{aux}} \quad (\text{A.6})$$

Pour une torche plasma d'arc transféré à courant continu et le système torche plasma associé, on peut appliquer les mêmes formules.

Pour une torche plasma d'arc à courant alternatif et le système de torche plasma associé, on peut appliquer les mêmes formules avec les valeurs efficaces.

Annexe B (informative)

Exposition humaine aux champs électromagnétiques

B.1 Exemple de mesures d'émissions électromagnétiques sur une torche plasma d'arc non transféré à courant continu dans différentes conditions de fonctionnement

Les mesures de champ électrique rayonné, de 1 kHz à 150 MHz, ont été réalisées sur une torche plasma, d'arc non transféré à courant continu, alimentée par une alimentation à thyristor et fonctionnant:

- sous une tension élevée (domaine de 1 000 V à 2 000 V et une valeur moyenne avec des fluctuations de ± 50 % autour de 1 kHz);
- à différents courants la gamme 300 A à 1 000 A.

L'antenne de mesure a été placée à 2 m de la torche, perpendiculairement à la direction du flux de plasma.

Un champ électrique existe à l'intérieur de deux bandes de fréquences:

- de 3 kHz à 4 kHz: champ électrique de 1 V/m (pour une tension d'arc de 1 200 V et un courant de 750 A) à 3,6 V/m (pour une tension d'arc de 2 000 V et un courant de 750 A);
- de 1 MHz à 2 MHz: champ électrique de 0,01 V/m à 0,2 V/m (s'accroît avec la tension d'arc et le courant d'arc).

NOTE V est la valeur efficace.

B.2 Valeurs seuil des émissions électromagnétiques à proximité du système torche en fonctionnement

Les exigences minimales de santé et de sécurité en ce qui concerne l'exposition des travailleurs aux dangers provoqués par les champs électromagnétiques sont spécifiées dans la Directive 2004/40/CE. Les valeurs seuil, déclenchant les actions correctrices sont spécifiées dans le Tableau 2 de la Directive.

Le domaine de fréquences couvert s'étend de 0 Hz à 300 GHz. Pour le domaine de fréquence f de 1 MHz à 10 MHz, les valeurs limites sont les suivantes (f exprimé en MHz):

- intensité du champ électrique E (V/m): $610/f$;
- intensité du champ magnétique H (A/m): $1,6/f$;
- induction magnétique B (μ T): $2/f$;
- courant de contact I_c (mA): 40.

Annexe C (normative)

Définition du rendement énergétique normalisé des torches plasma inductif et des systèmes de torche plasma

Le rendement de couplage énergétique est le rapport de l'énergie (de la puissance) couplée au plasma dans la cavité de décharge à la puissance plaque totale fournie à la torche.

Le rendement énergétique global est le rapport de l'énergie (de la puissance) couplée au plasma dans la cavité de décharge à l'énergie active totale (ou la puissance) fournie par la grille à l'alimentation électrique.

Les paramètres suivants sont à prendre en compte:

| | |
|-----------|--|
| I_p | courant plaque de l'alimentation RF |
| V_p | tension plaque de l'alimentation RF |
| I_g | courant grille de l'alimentation RF |
| Q_o | débit massique du gaz plasmagène |
| Q_{wt} | débit massique du liquide de refroidissement vers la torche plasma et vers le système de sonde d'injection |
| Q_{wr} | débit massique du liquide de refroidissement vers le réacteur en aval de la torche plasma |
| Q_{wp} | débit massique du liquide refroidissement vers le générateur de puissance RF |
| H_{we} | Enthalpie interne à l'entrée du liquide refroidissement |
| H_{wto} | enthalpie du liquide de refroidissement à la sortie de la torche et du système de sonde d'injection |
| H_{wro} | enthalpie du liquide de refroidissement en sortie du système réacteur |
| H_{wpo} | enthalpie du liquide de refroidissement en sortie de l'alimentation RF |
| W_c | énergie électromagnétique couplée dans le plasma |
| W_{pp} | puissance plaque de l'alimentation électrique RF |
| W_{pg} | pertes d'énergie de l'alimentation électrique RF |
| η_c | rendement de couplage énergétique du système de torche plasma inductif |
| η_i | rendement énergétique net du système torche plasma inductif |
| η_o | rendement énergétique global du système d'alimentation électrique de la torche plasma |

Considérant la torche comme un système fermé, la somme des enthalpies (entrée et sortie) de ce système est égale à zéro.

L'énergie électromagnétique couplée dans la torche plasma est égale à:

$$W_c = Q_{wt} \cdot (H_{wto} - H_{we}) + Q_{wr} \cdot (H_{wro} - H_{we}) \quad (C.1)$$

La puissance plaque appliquée à la torche est égale à:

$$W_{pp} = I_p V_p \quad (C.2)$$

Les pertes d'énergie dans l'alimentation RF sont égales à:

$$W_{pg} = Q_{wp} \cdot (H_{wpo} - H_{we}) \quad (C.3)$$

Le rendement de couplage énergétique est égal à:

$$\eta_c = W_c / W_{pp} \quad (C.4)$$

Le rendement énergétique net de la torche est égal à:

$$\eta_i = Q_{wr} \cdot (H_{wro} - H_{we}) / W_c \quad (C.5)$$

Le rendement énergétique global du système est égal à:

$$\eta_o = W_c / (W_c + W_{pg}) \quad (C.6)$$

Bibliographie

CEI/TS 60519-5, *Sécurité dans les installations électrothermiques – Partie 5: Spécifications pour la sécurité dans les installations plasma*

CEI 60974-7, *Matériel de soudage à l'arc – Partie 7: Torches*

Directive 2004/40/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 *concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques)*¹

¹ La Directive est disponible à <http://eur-lex.europa.eu/fr/index.htm>

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
P.O. Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch