

Diss. ETH No. 22281

SURFACE SENSORS FOR TEMPERATURE AND LIQUID THICKNESS
MEASUREMENT

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

FRANCESCO PAOLO D'ALEO

M. Sc. – Electronic Engineering

Università degli Studi di Palermo

born on 21.01.1978

citizen of Italy

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Horst-Michael Prasser (ETH Zurich), examiner

Prof. Dr. Philipp Rudolf von Rohr (ETH Zurich), co-examiner

Prof. Dr. Eckart Laurien (University of Stuttgart), co-examiner

2014

Abstract

Thermal fatigue is a crucial aspect of nuclear power plant safety considerations. Numerous incidents reported in the last two decades have demonstrated this. In order to obtain a better knowledge about and to more efficiently predict thermal fatigue of piping systems in nuclear power plants, several research projects have been initiated and international benchmarks have been proposed. Computational tools have been continuously improved over the years to predict with higher accuracy the mixing of fluids at different temperature (thermal mixing). These simulations require a calibration with experimental data. Most of the studies to date have focused on the bulk fluid by considering the velocity field and temperature fluctuations, and then deriving the response of the structure walls by means of transfer functions. Most advanced computational fluid dynamics (CFD) simulations are based on Large Eddy Simulations (LES) capable in providing time-resolved three-dimensional temperature fields. By applying the technique of conjugate heat transfer modelling, this extends to the temperature distribution in the bulk of the wall material. The latter is the key towards an estimation of the mechanical loads induced in the wall material and consequently an assessment of the aging due to fatigue.

At the present stage, these theoretical instruments require experimental validation, whereas, to date, temperature measurements at the wall surface remain challenging, and if possible they are performed with many restrictions.

A novel sensor array is introduced that detects temperature fluctuations directly from the wall surface subjected to thermal mixing. This sensor has been produced at the Laboratory of Nuclear Energy Systems, ETH Zurich and applied in an experiment on turbulent mixing in a horizontal square channel.

Two temperature sensor arrays have been investigated in this thesis. Both were developed with standard photolithographic techniques and materials used in the photonic and electronic industry. The material that provides the mechanical structure to the miniaturized detectors plays a significant role, since it emulates the response of a wall structure. The first type sensor was produced on borosilicate glass substrates using thin films of patterned platinum as thermo resistive element. Its characteristics were characterized in a purpose-built test channel.

In the course of this work, an algorithm that allows for the calculation of the heat flux has been proposed. This algorithm only requires the knowledge of the time track of the surface temperature and, in particular, it does not rely on the assumption of a semi-infinite medium. This overcomes the limitation of a method known from the literature, which is restricted to cases in which the substrate thickness can be assumed to be nearly infinite. In order to better approximate the behaviour of steel walls of real power plant components, a second generation of resistive detectors was fabricated on a metallic substrate. Due to mechanical strength of the metal substrate, it was possible to fit it into an existing test facility GEMIX (General Mixing Experiment) at the Paul Scherrer Institute (Villigen, Switzerland) and apply it to turbulent mixing tests in the horizontal test section of this facility.

Taking benefit of the technological experience obtained by manufacturing the temperature sensors, a miniaturized liquid film sensor has also been devised with the intention of integrating this device with the temperature sensor array. In this manner it will be possible to measure the temperature at the very first layers in front of the wall surface. The liquid film sensor was produced on a

glass substrate, calibrated against a thin layer of a liquid film. Electrical conductivity measurements also allow the detection of temperature changes, which is an interesting complementary use of the film sensor.

Sommario

La fatica termica dovuta a fluttuazioni casuali di temperatura assume un ruolo cruciale quando entrano in gioco aspetti riguardanti la sicurezza delle centrali nucleari. Questo, purtroppo, è stato ampiamente dimostrato dai numerosi incidenti registrati negli ultimi decenni, in occasione dei quali si è potuto verificare che i condotti metallici soggetti a questo fenomeno di degradazione meccanica sono quelli al cui interno fluidi a diversa temperatura si miscelano inducendo elevate fluttuazioni termiche.

L'interesse ad acquisire una maggiore conoscenza del fenomeno ha spinto la ricerca a migliorare gli strumenti di calcolo al fine di ottenere modelli fisici che riproducessero più fedelmente i casi reali. D'altra parte, i risultati ottenuti tramite simulazioni al calcolatore devono essere necessariamente convalidati da esperimenti mirati. La maggior parte degli studi effettuati, dunque, si è concentrata sulla misura del campo di velocità e temperatura dei fluidi coinvolti, derivando poi lo stress termico alla superficie attraverso funzioni di trasferimento che descriverebbero il comportamento termico della parete.

Il contributo di questo lavoro è, invece, quello di fornire, mediante la fabbricazione *ad hoc* di sensori di temperatura, misure di temperatura direttamente dalla superficie soggetta a fatica termica durante la miscelazione dei fluidi. I sensori, interamente sviluppati nelle clean room del Politecnico Federale di Zurigo, sono stati, pertanto, applicati ad una sezione di prova già esistente (GEMIX) presso i laboratori di Termoidraulica (LTH) del Paul Scherrer Institute (Villigen, Svizzera).

Nel corso dei primi esperimenti sono stati impiegati substrati di vetro borosilicato sul quale i materiali termo resistivi, come il platino ottenuto da

deposizione fisica da vapore, fungono da trasduttore dei cambiamenti di temperatura in variazione di resistenza elettrica.

Tuttavia, il vetro borosilicato, a differenza delle pareti metalliche, oltre ad essere un pessimo conduttore termico presenta l'ulteriore inconveniente di essere meccanicamente fragile.

Il materiale usato come supporto meccanico dei sensori gioca, infatti, un ruolo di primo piano, perché imita il comportamento termico delle pareti a contatto con le fluttuazioni termiche. Per quest'ultimo motivo, gli sforzi sono stati concentrati sulla fabbricazione di sensori termo resistivi su substrati metallici come l'alluminio che bene si presta all'emulazione di situazioni reali, fornendo anche un'ottima resistenza meccanica.

Nel corso di questo lavoro, è stato anche affrontato il problema del calcolo del flusso di calore mediante i soli rilevamenti di temperatura alla superficie di una parete piana. Il risultato ottenuto è stato un algoritmo capace di calcolare il flusso di calore il quale, diversamente da quelli esistenti, non necessita l'ipotesi di mezzo semi-infinito. In altri termini, lo spessore del materiale può essere sottile e la sua conducibilità termica elevata, ciò consentendo di ottenere informazioni non solo sulla temperatura alla superficie ma anche sul gradiente alla parete che determina lo stress meccanico.

Invero, la conducibilità elettrica di un fluido è strettamente correlata alla sua temperatura. Su quest'ultimo principio si è potuto sviluppare un altro dispositivo atto a misurare, tramite misure di conducibilità elettrica, lo spessore di film liquidi. Analogamente, se lo spessore di liquido rimane costante, variazioni di conducibilità rifletteranno cambiamenti locali di temperatura.

Questo consentirebbe, tramite un'opportuna geometria dei sensori, misure non invasive della temperatura del fluido che lambisce la superficie del trasduttore.