ETH zürich

ETH Library

Mixing Phenomena Relevant to Thermal Fatigue in T-junctions

Doctoral Thesis

Author(s):
Kickhofel, John

Publication date:
2015

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-010598898

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH No. 22904

MIXING PHENOMENA RELEVANT TO THERMAL FATIGUE IN T-JUNCTIONS

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr.sc. ETH Zurich)

presented by

JOHN LOUIS KICKHOFEL

M.Sc. Nuclear Engineering
ETH Zurich – EPF Lausanne

born on 20.10.1986

citizen of the United States of America

Examiners:

Prof. Dr. Horst-Michael Prasser (ETH Zurich), examiner
Prof. Dr. Eckart Laurien (University of Stuttgart), co-examiner
Prof. Dr. Yassin Hassan (Texas A&M University), co-examiner

Abstract

The focus of this thesis is single-phase mixing in the vicinity of T-junctions in nuclear power plants (NPP) in the context of the thermal fatigue phenomenon driven by large amplitude water temperature fluctuations. Specific zones of safety-relevant piping in NPPs are known to be at risk of developing surface and even through-wall crack networks, often in the vicinity of T-junctions. At certain locations, turbulent mixing and/or thermal stratification are capable of generating damage-inducing thermal fluctuations of appropriate frequency and amplitude.

Turbulent penetration in T-junctions with weak in-flow, as in the case of a leaking valve scenario, while representing a mixing scenario from which commercial NPPs have in the past suffered damage, has yet to be investigated in detail from a fluid-dynamic perspective. This work has endeavored to provide a comprehensive, foundational exploration of this mixing scenario experimentally with a high-density of data in space and time domains and in theory through the utilization of time-resolved CFD simulations. To this end, an adiabatic T-junction facility for the study of turbulent penetration was constructed and utilized. A large number of experiments at the facility with custom built instrumentation in the form of wire-mesh sensors have illuminated important phenomena related to thermal fatigue inducing scenarios, such as the Farley-Tihange phenomena.

Another underdeveloped, yet highly practical domain related to thermal fatigue in NPP piping is that of cross-flow mixing in T-junctions at high ΔT, approaching reactor operating conditions. For the purpose of studying coolant mixing at these conditions, where thermal stratification begins to dominate, a novel mesh sensor package has been developed and patented. The new mesh sensor has been successfully trialed in high-temperature cross-flow mixing experiments (at up to $\Delta T = 232$ºC at 7 MPa) in collaboration with the University of Stuttgart. The results elucidate not only the downstream temperature profile with unprecedented resolution, but also countercurrent stratification developing upstream at high Richardson numbers.

The new mesh sensor technology is potentially applicable to all NPP-relevant pipe flows in both pressurized and boiling water reactors with a foreseeable temperature resistance of up to 350ºC at 22 MPa. It represents an evolutionary step from prior state-of-the-art in a robust, scalable package design which could incorporate additional instrumentation in the form of thermocouples or added mesh sensor layers for recovering velocity or interfacial area concentration.

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Mischung einphasiger Ströme in der Umgebung von T-Verbindungen in Kernkraftwerken (KKW) vor dem Kontext der thermomechanischen Ermüdung durch Temperaturfluktuationen mit hoher Amplitude. Dass bestimmte Zonen in sicherheitsrelevanten Teilen des Rohrnetzes KKWs für Ermüdungsrisse anfällig sind, insbesondere im Bereich von T-Verbindungen, ist bekannt. An bestimmten Stellen kann turbulente Mischung und/oder thermische Schichtung zu thermischen Fluktuationen führen, deren Höhe und Frequenz geeignet ist, Schäden zu verursachen.

Turbulentes Eindringen der Hauptströmung in schwach durchströmte Abzweigungen von T-Verbindungen, wie es beispielsweise bei Ventillecks vorkommt, hat in der Vergangenheit in KKWs zu Schäden geführt. Dieses Phänomen ist bisher nicht ausreichend untersucht worden. Ziel dieser Arbeit war eine umfassende, grundlegende Untersuchung der turbulenten Mischungsphänomene, sowohl experimentell als auch durch CFD-Simulationen. Mit diesem Ziel wurde eine Versuchseinrichtung für die Untersuchung adiabatischer Mischungsvorgänge aufgebaut. Eine grosse Zahl von Experimenten unter Verwendung von speziell für diesen Zweck gebauten Gittersensoren hat einige wichtige Strömungsphänomene beleuchtet, die im Hinblick auf thermo-mechanische Ermündung von grosser Bedeutung sind, beispielsweise das Farley-Tihange Phänomen.

Ein anderes, wenig untersuchtes aber praktisch relevantes Gebiet ist die Mischung von Kreuzströmen in T-Verbindungen bei grossen Temperaturdifferenzen, in denen die Temperaturschichtung dominant ist. Zur Untersuchung der Kühlwassermischung unter diesen Bedingungen wurde ein neuartiger Gittersensor entwickelt und patentiert. Der neue Gittersensor wurde in Kooperation mit der Universität Stuttgart bei Temperaturdifferenzen bis zu 232°C und Drücken von 7 MPa erfolgreich getestet. Die Resultate verdeutlichen nicht nur das unterstromige Temperaturprofil mit bisher nicht erreichter Auflösung sondern zeigen auch die Entwicklung einer Temperaturschichtung durch Gegenstrom im oberstromigen Hauptast der T-Verbindung.

Die neue Gittersensortechnologie ist potenziell für alle relevanten Rohrströmungen in KKWs mit Druck- und Siedewasserreaktoren einsetzbar, bis hin zu Temperaturen von 350°C und Drücken von 22 MPa. Das robuste, skalierbaren Design erlaubt zudem die Integration von Thermoelementen und zusätzlichen Gittersensorebenen. Letztere würden es ermöglichen, die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit und der Grenzflächendichte über dem Strömungsquerschnitt zu messen.

Sommario

La ricerca descritta in questa tesi ha come obbiettivo lo studio dei fenomeni di miscelazione termica che avvengono in prossimità delle giunzioni a T. La presenza di questi componenti termoidraulici è molto comune nelle tubazioni delle centrali nucleari e spesso costituisce teatro di fenomeni di fatica termica. Tale fenomeno mette a repentaglio l'integrità meccanica delle strutture e, pertanto, la sicurezza dello stesso impianto. L'origine è attribuita alla miscelazione turbolenta tra fluidi, spesso flussi d'acqua, con una differenza di temperatura di svariate decine di gradi. Lungo le tubazioni metalliche, infatti, le indotte stratificazioni termiche e/o la miscelazione turbolenta sono in grado di generare fluttuazioni termiche di rilevante ampiezza nonché frequenze che facilitano la propagazione di cricche nei materiali costituenti le pareti dei condotti.

Il cosiddetto fenomeno di "penetrazione turbolenta" nelle giunzioni a T in condizioni di flusso debole, come nel caso di valvole che hanno ormai perso la loro tenuta, rappresenta uno scenario tipico che, ancora oggi, è causa di preoccupazione per le centrali nucleari commerciali. Ne consegue la necessità di uno studio maggiormente dettagliato dal punto di visto fluidodinamico. Pertanto, in questo lavoro si è cercato di fornire una completa esplorazione sperimentale dei fenomeni di miscelazione che ricalcano i casi succitati. Ciò è stato reso possibile mediante dati con alta risoluzione spaziale e temporale mentre teoricamente il contributo è stato apportato dall'utilizzo di simulazioni in regime transitorio. A tal fine è stata realizzata una sezione di test che ha permesso di emulare gli scenari di miscelamento nelle giunzioni a T in condizioni adiabatiche. Inoltre, un vasto numero di esperimenti è stato condotto tramite strumentazione costruita *ad hoc*, quale il wire-mesh sensor, che ha permesso di giungere ad importanti osservazioni relative ai fenomeni di fatica termica, come quelli avvenuti sia nella centrale di Farley che in quella di Tihange.

Il *cross-mixing* è un altro di quegli effetti ancora poco studiati nell'ambito della fatica termica. Esso risulta più evidente quando ci si avvicina alle condizioni operative reali delle centrali nucleari, specialmente per alte differenze di temperatura. Allo scopo, poi, di approfondire lo studio della fluidodinamica in presenza di tali condizioni si è reso necessario lo sviluppo di un nuovo *wire-mesh sensor* capace di resistere ad alte pressioni e gradienti di temperatura (7 MPa a $\Delta T = 232$ °C). La nuova strumentazione è stata brevettata ed utilizzata con successo in una campagna di misure in collaborazione con l'Università di Stoccarda. I risultati non solo hanno messo in luce i profili di temperatura a valle della giunzione a T, con una risoluzione spaziale e temporale senza precedenti, ma hanno anche evidenziato una stratificazione termica che si sviluppa a monte per alti valori del numero di Richardson.

Il nuovo equipaggiamento è potenzialmente applicabile a tutte quelle condizioni che si trovano sia nei *Pressurized* che nei *Boiling Water Reactors* con un prevedibile limite in temperatura che si spinge fino a 350 °C e pressioni fino a 22 MPa. Questo rappresenta un ulteriore passo evolutivo allo stato dell'arte, in quanto il progetto e la sua robustezza sono facilmente scalabili. É anche prevista la possibilità di incorporare strumentazione aggiuntiva

come termocoppie, sensori capacitivi o altri *wire-mesh sensor*, in grado di misurare grandezze fluidodinamiche rilevanti quali, ad esempio, i campi di velocità e la concentrazione dell'area di interfase.

Résumé

Le thème central de cette thèse concerne le mélange à une phase à proximité de jonctions en T dans les centrales nucléaires, dans le contexte du phénomène de fatigue thermique induit par des fluctuations à large amplitude de la température de l'eau. Des zones spécifiques de la tuyauterie pertinentes pour la sureté des centrales nucléaires comportent un risque de développer des réseaux de fissures en surface, et même, à travers la paroi à proximité des jonctions en T. À certaines locations, un mélange turbulent et/ou une stratification thermique sont capables de générer des fluctuations thermiques de fréquence et d'amplitude appropriées induisant des dommages.

Une pénétration turbulente dans les jonctions en T à faible débit entrant, comme dans le cas d'un scénario avec une valve fuyante, alors qu'elle représente un scénario de mélange qui a par le passé causé des dommages dans des centrales nucléaires commerciales, doit être à présent investie en détail du point de vue de la dynamique des fluides. Ce travail s'efforce à fournir une exploration compréhensive et fondatrice du scénario de mélange par l'expérience, avec des données à haute densité spatiale et temporelle, ainsi que théoriquement, par la simulation numérique CFD à résolution temporel. À cette fin, un banc expérimental, constitué d'une jonction en T adiabatique servant à l'étude d'une pénétration turbulente, a été construit et mis en service. De nombreuses expériences conduites avec le banc expérimental et une instrumentation sur mesure sous forme de grille sensorielle ont mis en lumière des phénomènes importants en lien avec des scénarios induisant de la fatigue thermale tel que le phénomène Farley-Tihange.

Un autre domaine encore sous-développé, néanmoins hautement pratique, lié à la fatigue thermique dans la tuyauterie des centrales nucléaires, est celui du mélange à courant croisé dans les jonctions de type T à haut différentiel de température approchant les conditions d'opération d'un réacteur. La nouvelle grille sensorielle fut mise à épreuve avec succès lors d'expériences de mélange à courant croisé à haute température (jusqu'à 232°C et 7MPa) menées en collaboration avec l'université de Stuttgart. Les résultats élucident non seulement le profil de température en aval de l'écoulement, avec une résolution sans précédents, mais aussi la stratification à contre-courant qui se développe en amont pour les hauts nombres de Richardson.

La grille sensorielle de technologie nouvelle peut être potentiellement appliquée sur chaque écoulement dans les parties de la tuyauterie pertinentes d'une centrale nucléaire à eau pressurisée ou à eau bouillante avec une résistance à court terme à des températures atteignant 350°C pour 22MPa. Elle représente une étape évolutive par rapport à la dernière technologie de pointe, de par sa robustesse et son design évolutif pouvant incorporer une instrumentation additionnel sous forme de thermocouples ou de couches de grilles sensorielles supplémentaires afin de reconstituer la vitesse d'une zone de concentration interfaciale.