

Stadiul actual în modelarea matematică a fenomenelor de sudare

Current status in the mathematical modelling of weld phenomena

Cerjak H., Kozeschnik E.

Institute for Materials Science, Welding and Forming, Graz University of Technology, Austria

Cuvinte cheie

Modelare matematică, sudare, privire de ansamblu

Keywords

Mathematical modelling, welding, overview

1. Introducere și vedere generală

În toamna anului 2003 la Schloss Seggau s-a ținut din nou Seminarul Internațional „Analiza Numerică a Sudabilității (NAV)”, adunând împreună experți mondiali în modelarea și simularea în domeniul sudării și a subiectelor legate de sudare. Întâlnirea tradițională a acestui eveniment a avut loc într-un castel antic situat la 40 km sud de Gratz, care este al doilea oraș ca mărime din Austria. Seminarul din anul 2003 a fost al șaptelea dintr-o serie de seminarii de foarte mare succes. Începând cu primul dintre aceste evenimente în 1991, seminarul a fost organizat de Institutul de Știința Materialelor, Sudură și Deformare (IWS) al Universității Tehnologice din Gratz sub

1. Introduction and overview

In autumn 2003, the International Seminar „Numerical Analysis of Weldability” (NAW) was held again in Schloss Seggau, bringing together the world-leading experts of modelling and simulation in the field of welding and welding related topics. The traditional venue of this event is an ancient castle 40 km south of Graz, which is the second largest city of Austria. The 2003 Seminar was the seventh in a series of very successful seminars. Beginning with the first of these events in 1991, the seminar was organized by the Institute for Materials Science, Welding and Forming (IWS) of the Graz University of Technology under the sponsorship of the International Institute

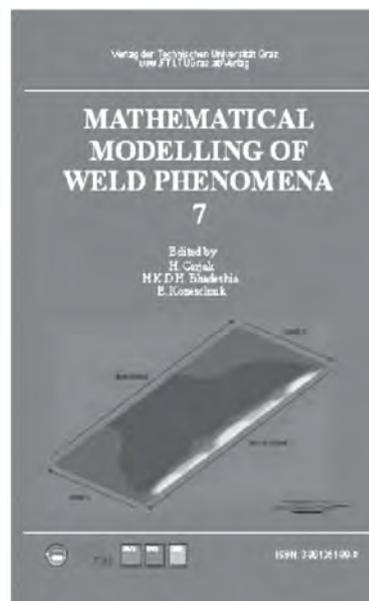
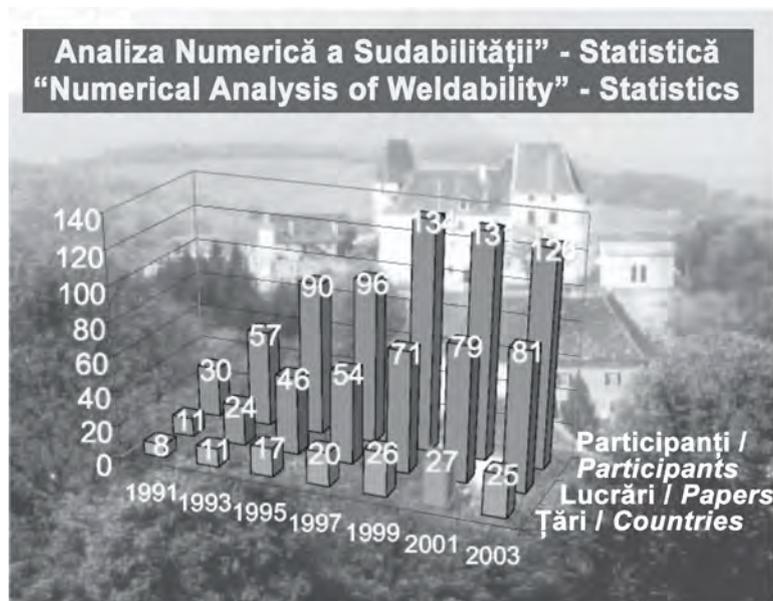


Figura 1. Participarea la seminar între 1991 și 2003 (stânga) și Rapoartele NAW 2003 „Modelarea matematică a fenomenelor de sudare 7”/

Figure 1. Attendance at the Seminar between 1991 and 2003 (left) and proceedings of NAW 2003 „Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7”

sponsorizarea IIW (Institutul Internațional de Sudură), Grupul de Lucru „Modelarea Matematică a Fenomenelor de Sudare”. Astăzi, aceste serii de seminarii reprezintă una dintre cele mai renumite conferințe în domeniul modelării și simulării computerizate în sudură. Seriile de referate ale seminarului

of Welding (IIW), Working Group „Mathematical Modelling of Weld Phenomena”. Today, this seminar series represents one of the most renowned conferences in the field of modelling and computer simulation in welding. The seminar proceedings series „Mathematical Modelling of Weld Phenomena” is an

„Modelarea Matematică a Fenomenelor de Sudare” constituie o publicație de referință indispensabilă care cuprinde analize extinse precum și articole științifice privind stadiul domeniului.

Seminarul din anul 2003 a fost urmărit de 130 de participanți din 25 de țări, în majoritate tineri, care au participat atât la prezentările sesiunii orale cât și la cele poster. Au fost vizibile progrese în special în domeniul modelării hibride și al modelării reciproce, precum și noile abordări experimentale de interes, care au permis observarea in-situ a transformării microstructurii în timpul sudării, prin aplicarea radiației sincrotrone. La început s-a discutat integrarea modelelor de defect în comportarea componentei.

Cea mai importantă observație a acestui seminar a fost că 20% dintre lucrări s-au prezentat de către delegații venind din industrie. Aceasta reflectă penetrarea abordării prin modelare în fabricație; educarea industriei a fost o țintă a conferinței încă de la fondarea sa cu aproximativ 14 ani în urmă.

Pentru a doua oară seriile de seminar „Premiul pentru cea mai bună lucrare Kenneth Easterling al IIS” a fost acordat lucrării „cu cea mai mare contribuție din ultimii trei ani pentru progresele în cunoașterea sau practica privind modelarea matematică a unui fenomen de sudare”. După nominalizare, câștigătorii premiului [1, 2] sunt selectați într-un proces de alegere multi-stadiu efectuat de președintele seminarului și sesiunii. Acest premiu este un premiu IIS oficial și el este sponsorizat de IIS.

Pe lângă domeniile importante și de interes privind cercetarea modelării fenomenelor de sudare, seminarul din anul 2003 a inclus următoarele subiecte:

- Fenomene din domeniul topirii și arcului electric
- Solidificarea
- Modelarea microstructurii în metalul sudurii și zonei influențate termic (ZIT)
- Microstructura și caracteristicile mecanice
- Influența tratamentului termic post-sudare
- Fenomenele de fisurare și metodele de încercare
- Tensiunile reziduale și distorsiunea
- Efectele ale hidrogenului
- Procese de sudare speciale
- Unele de modelare și programe pentru computer

În continuare se va analiza stadiul curent în câteva subiecte selectate și sunt analizate tendințele recente din cercetare și dezvoltare.

2. Stadiul cunoașterii în NAW

2.1. Fenomene din sectorul topirii și arcului electric

La seminarul NAW (Analiza numerică a sudabilității) din anul 2001 la această categorie s-au prezentat 10 lucrări, toate fiind legate de analiza numerică a diferitor fenomene din sectorul topirii și arcului electric. În anul 2003 s-au prezentat 6 lucrări, care au privit direct aspectele modelării (din care una a primit Premiul pentru cea mai bună lucrare Keneth Easterling al IIW) și o lucrare care arată curgerea la suprafață într-un cordon de sudură folosind tehnici experimentale.

În dinamica sectorului de modelare a sudurii s-a produs un succes enorm în ultimi zece de ani. Pornind cu modelele curgerii laminare ale fluidelor de la mijlocul anilor 1980, abordările curente sunt bazate pe curgerea turbulentă pentru descrierea mai bună a conductivității termice a cordonului sudurii. Este bine cunoscut faptul că trebuie să se considere mai multe mecanisme fizice

indispensabile referințe publicate incluzând extensive revizii precum și state-of-the-art articole științifice.

The 2003 Seminar was attended by 130 mostly young participants from 25 countries participating in both oral session and poster presentations. Special progress became visible in the field of hybrid modelling and inverse modelling as well as interesting new experimental approaches, which allowed the in-situ observation of the microstructural development during welding by the application of synchrotron radiation. For the first time, the integration of defect-models in the component behaviour was discussed.

A most important observation of this seminar was that 20% of the papers were presented from delegates coming from industry. This reflects the penetration of the modelling approach within manufacturing; the education of industry has been a goal of the conference ever since its foundation some 14 years ago.

For the second time in the seminar series, the ‘IIW Kenneth Easterling Best Paper Award’ was presented to the paper giving „the best contribution made over the three years preceding the award to the advancement of knowledge or practice in respect of the mathematical modelling of a welding phenomenon”. After nomination, the award winners [1, 2] are selected in a multi-stage election process performed by the seminar and session chairmen. This award is an official IIW award and it is sponsored by the IWS.

Out of all the important and interesting fields of research on modelling of weld phenomena, the 2003 seminar included coverage of the following subjects:

- Melt Pool and Arc Phenomena
- Solidification
- Microstructural Modelling in Weld Metal and Heat Affected Zone
- Microstructure and Mechanical Properties
- Influence of Post Weld Heat Treatment
- Crack Phenomena and Testing Methods
- Residual Stresses and Distortion
- Hydrogen Effects
- Special Welding Processes
- Modelling Tools and Computer Programs

Subsequently, state-of-the-art in some selected topics will be reviewed and recent trends in research and development are analyzed.

2. State-of-the-art in NAW

2.1. Melt pool and arc phenomena

On the 2001 NAW seminar, ten papers have been presented in this category, all of them related to the numerical analysis of various melt pool and arc phenomena. In 2003, six papers have been presented, which have been directly concerned with modelling aspects (one of which received the IIW Kenneth Easterling Best Paper Award) and one paper showing the surface flow in a weld bead using experimental techniques.

In modelling weld pool dynamics, enormous progress has been made over the past decades. Starting with laminar fluid flow models in the mid 1980’s, current approaches are based on turbulent flow to better describe the thermal conductivity of the bead. It is well known that several different physical mechanisms (convective heat transfer, composition dependence of surface tension, heat source geometry etc.) must be taken into account to obtain correct bead flow and weld pool shapes.

diferite (transferul termic prin convecție, dependența de compoziția chimică, a tensiunii de suprafață, geometria sursei termice, etc.) pentru a obține curgerea corectă în cordonul sudurii și formele băii de sudare. Un subiect major la NAW 2003 a fost problema privind ce ar putea folosi aceste activități de modelare de succes pentru practician, care uzual nu este capabil să determine cu suficientă precizie parametrii de intrare necesari pentru model. Astfel, în grupul prof. DebRoy de La Universitatea de Stat din Pennsylvania s-a dezvoltat „*Un model bi-direcțional rapid de transfer termic, curgere a fluidului și a profilului suprafeței libere în sudura în col GMA (sudare în mediu de gaz protector)*” care furnizează o metodologie convenabilă de estimare a caracteristicilor de material necunoscute dintr-un set limitat de date experimentale”.

Bazat pe ecuația de continuitate, conservarea de moment și a energiei și pe ecuația de echilibru a forței statice pentru profilul suprafeței băii de sudare, s-a stabilit un model care descrie evoluția cordonului sudurii în timpul procesului de sudare. Din motive practice s-a introdus un sistem de coordonate curbilinii. În final s-au identificat cei trei parametri necunoscuți (randamentul arcului, vâscozitatea efectivă a lichidului și conductivitatea termică efectivă a lichidului), care s-au optimizat pentru un set de experimente reprezentative. Din studiu s-au tras următoarele concluzii:

- Calculul transferului termic și al curgerii fluidului a indicat că în baia de sudare metalul lichid a fost condus în principal de forța electromagnetică și de tensiunea tangențială Maragnoni și într-o măsură mai mică de forța ascensională.
- Convecția metalului lichid a jucat un rol dominant în disiparea căldurii în baia de sudare. Convecția a determinat distribuția de temperatură și forma băii de sudare.
- Noul model ar putea estima parametrii necunoscuți precum randamentul arcului, conductivitatea termică efectivă,

A major topic at NAW 2003 has been the question, what the use of these successful modelling activities could be for the practitioner, who is usually not able to determine necessary input parameters for the models with sufficient accuracy. Therefore, in the group of Prof. DebRoy from Pennsylvania State University, „*A Smart Bi-directional Model of Heat Transfer, Fluid Flow and Free Surface Profile in GMA Fillet Welding*” has been developed, which provides a convenient methodology to estimate unknown materials properties from a limited set of experimental data.

Based on the continuity equation, momentum and energy conservation and a static force balance equation for the pool surface profile, a model was set up to describe the evolution of the weld bead during the welding process. For practical reason, a curvilinear coordinate system was introduced. Finally, three unknown parameters were identified (arc efficiency, effective viscosity of liquid and effective thermal conductivity of the liquid), which are optimized on a set of representative experiments. The following conclusions were drawn from the study:

- The heat transfer and fluid flow calculation indicated that in the weld pool, the liquid metal was driven mainly by the electromagnetic force and the Marangoni shear stress and, to a much lesser extent, by the buoyancy force.
- The liquid metal convection played a dominant role in dissipating the heat in the pool. The convection determined the temperature distribution and shape of the weld pool.
- The new model could estimate the unknown parameters such as arc efficiency, effective thermal conductivity and effective viscosity based on only a few experimental measurements.
- The accuracy of the estimated set of the unknown parameters was verified using the numerical heat transfer and fluid flow model and the experimental data (see Figure 2).

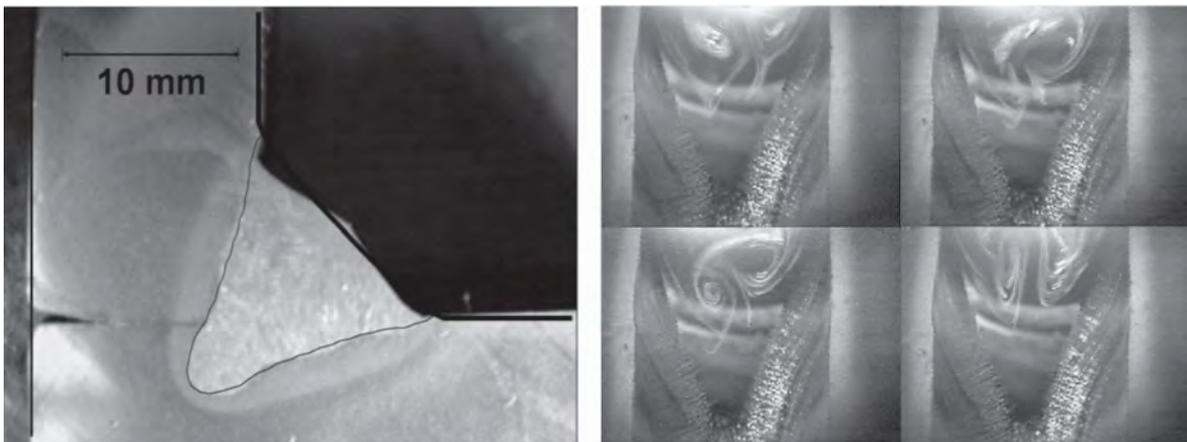


Figura 2. Stânga: Comparația între geometria sudurii calculate și din experiment. Linia plină reprezintă limita zonei de topire calculată (Kumar ș.a., NAW 2003). Dreapta: Vizualizarea curgerii complexe la suprafața a băii de sudare și interacțiunea turbulenței în timpul stării de curgere instabilă (Henrikson, NAW 2003) /
Figure 2. Left: Comparison between the calculated and experimental weld geometry. The solid line represents the calculated fusion zone boundary (Kumar et al., NAW 2003). Right: Visualization of the complex weld-pool surface flow and vortex interaction during an unstable flow condition (Henrikson, NAW 2003)

și vâscozitatea efectivă, bazat doar pe câteva măsurători experimentale.

- Precizia setului estimat a parametrilor necunoscuți s-a verificat folosind transferul termic numeric și modelul de curgere a fluidului și datele experimentale (vezi figura 2).

O altă contribuție foarte importantă la conferința NAW 2003

Another very important contribution to the NAW 2003 conference demonstrated a new experimental technique that directly visualized weld pool shape and surface flow based on an imaging system using a CCD camera in the ultra-violet wavelength range. The subsequent figure shows an example of turbulent surface flow on the liquid melt pool. Visualization of the

a demonstrat o nouă tehnică experimentală care a vizualizat direct forma băii sudurii și curgerea la suprafață bazat pe un sistem de formare a imaginii ce folosește o cameră CCD în domeniul lungimii de undă în ultraviolet. Figura următoare arată un exemplu de curgere turbulentă la suprafață pentru baia de sudare din metal topit lichid. Vizualizarea traiectoriilor a fost posibilă datorită contrastului particulelor de zgură ce plutesc pe partea de sus a metalului lichid.

2.2. Modelarea microstructurii, tratamentul termic și a comportării componente

În timpul ultimelor Seminarii NAW s-au prezentat un număr important de modele pentru descrierea evoluției microstructurii în timpul sudării. Unele dintre ele s-au focalizat pe simularea evoluției microstructurilor întregi (Hemmer, ș.a., NAW 2001), altele descriu nuclearea, creșterea și formarea de precipitate grosiere în timpul proceselor de sudare (Myhr, ș.a., NAW 2001). Alte modele descriu dizolvarea și creșterea precipitărilor în profilul-C tranzient al sudurilor disimulare a componentelor multiple în timpul tratamentului termic post-sudare (Kozeschnik, ș.a., NAW 2001). La Seminarul NAW 2003, majoritatea lucrărilor

trajectories has been possible due to the contrast of slag particles floating on top of the liquid metal.

2.2. Microstructure modelling, heat treatment and component behaviour

During the last NAW Seminars, a number of important models for describing the evolution of microstructure during welding have been presented. Some of them have focussed on simulating the evolution of the entire microstructures (Hemmer et al., NAW 2001), some of them describe the nucleation, growth and coarsening of precipitates during weld processes (Myhr et al., NAW 2001). Other models describe the dissolution and growth of precipitates in the transient C-profile of complex multi-component dissimilar welds during PWHT (Kozeschnik et al., NAW 2001). At the NAW 2003 Seminar, the majority of papers have been presented in this category (19 papers). The topics covered modelling of laser welds, non-equilibrium microstructure evolution, phase transformations during multi-pass welding, welding of Ni-base single crystals, in-situ observation of phase transformations, strain evolution during explosive post weld treatment, performance of spot welds,

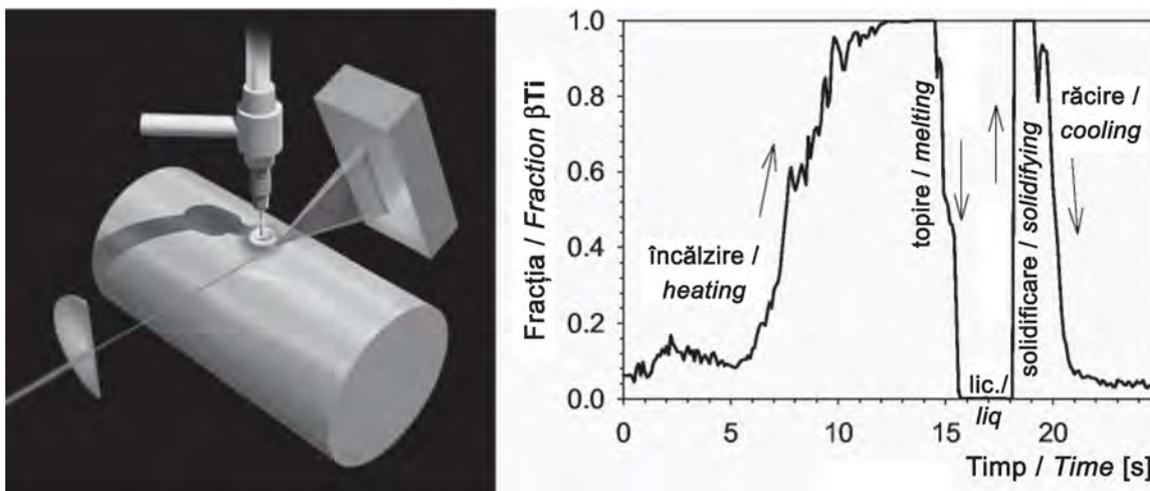


Figura 3. Stânga: Reprezentarea schematică a instalației SRXRD folosită la observații in-situ ale transformărilor de fază în timpul sudării. Fasciculul de raze-X intră de la stânga, trece prin orificiu, se difractă de către suprafața barei în timpul sudării și este colectat de un detector de raze-X plasat în aval de sursa de raze-X.

Dreapta: Rezultatele TRXRD ce arată fracția fazei β în aliajul Ti-6Al-4V sunt trasate grafic în funcție de timp la o poziție a razelor-X de 4,5 mm de la centrul sudurii. Sunt observate transformarea spre β , topirea, solidificarea și retransformarea până la α (Elmer ș.a., NAW 2003) /

Figure 3. Left: Schematic drawing of the SRXRD setup used for in-situ observations of phase transformations during welding. The x-ray beam enters from the left, passes through the pinhole, diffracts from the surface of the bar during welding and is collected by an x-ray detector placed downstream from the x-ray source.

Right: TRXRD results showing the fraction β phase in Ti-6Al-4V plotted versus time at an x-ray position 4.5 mm from the center of the weld. Transformation to β , melting, solidification, and back transformation to α are all observed [Elmer et al., NAW 2003]

s-au prezentat în această categorie (19 lucrări). Subiectele au acoperit modelarea sudurilor laser, evoluția microstructurii în afara echilibrului, transformărilor de fază în timpul sudării în mai multe treceri, sudarea monocristalelor pe bază de nichel, observarea in-situ a transformărilor de fază, evoluției deformației în timpul tratamentului sudurii post explozie, performanța sudurilor în puncte, transformarea ductil-fragil în îmbinările sudate și analizei ruperii componentelor sudate.

Aceste modele numerice uzual sunt calibrate într-o măsură mai mare sau mai mică cu datele experimentale. Atunci când se încearcă să se facă lumină asupra problemei, privind care fază

ductile-to-brittle transition in welded joints and fracture analyses of welded components.

These numerical models are usually calibrated to a more or less extent on experimental data. When trying to shed light on the question, which phase dominates solidification in high-alloy materials, a new experimental technique for in-situ observation of phases during welding has been presented at the NAW 2003 seminar (Elmer et al, NAW 2003). Accordingly, direct observation of the fusion zone phase transformations could be made during GTA spot welding of a Ti-6Al-4V alloy using a novel Time Resolved X-Ray Diffraction (TRXRD) technique.

domină solidificarea în materialele înalt aliate la Seminarul NAW 2003 s-a prezentat o nouă tehnică experimentală pentru observarea in-situ a fazelor în timpul sudării (Elmer ș.a., NAW 2003). În consecință, în timpul sudării GTA în puncte s-a putut face observarea transformărilor de fază în zona de topire a aliajului Ti-6Al-4V folosind o nouă tehnică de Difracție cu raze-X cu decizie în timp (TRXRD). Fascicolul de raze-X are un diametru de 540 μm și un timp de decizie de 100 ms. Aceste observații s-au cuplat cu calculele termodinamice ale echilibrului de fază și cu modelarea numerică a temperaturilor sudurii. În figura 3. se arată o reprezentare schematică a tehnicii TRXRD.

Informația acestor experimente a cuprins evoluția în timp real a transformărilor $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow L \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ în zona de topire a sudurii. În timpul încălzirii sudurii măsurătorile TRXRD au arătat că transformarea $\alpha \rightarrow \beta$ a mers până la capăt peste temperatura de transformare a lui β cu o cantitate semnificativă de supraîncălzire necesară pentru finalizarea transformării. Această supraîncălzire se datorează vitezei rapide de încălzire a sudurii. În timpul răcirii sudurii măsurătorile TRXRD din zona de topire au arătat că inițierea transformării lui β a început la temperaturi chiar sub temperatura M_s . O dată inițiată, transformarea s-a produs rapid și aproape s-a finalizat până la martensita α' în mai puțin de 2 sec. peste un domeniu de temperatură de aproximativ 200°C.

2.3. Tensiunile reziduale și distorsiunea

Analiza numerică a tensiunilor reziduale și distorsiunea în timpul sudării componentelor mari este un subiect clasic încă de la începuturile NAW. S-au prezentat un total de 11 lucrări

The X-ray beam has 540 mm diameter and a time resolution of 100 ms. These observations have been coupled to thermodynamic calculations of phase equilibria and numerical modelling of weld temperatures. Figure 3 shows a schematic drawing of the TRXRD technique.

The information of these experiments comprised of the real time evolution of the $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow L \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ transformations in the weld fusion zone. During weld heating, the TRXRD measurements showed that the $\alpha \rightarrow \beta$ transformation went to completion above the β transus temperature with a significant amount of superheat required to complete the transformation. This superheat is due to the rapid heating rate of the weld. During weld cooling, the TRXRD measurements in the FZ showed that the initiation of the transformation of β began at temperatures just below the M_s temperature. Once initiated, the transformation occurred rapidly and nearly completely to α' martensite in less than 2 s over a temperature range of approximately 200°C.

2.3. Residual stresses and distortion

Numerical analysis of residual stresses and distortion during welding of large components is a classical topic since the beginning of NAW. A total of eleven papers have been presented addressing issues such as prediction of distortions in large thin structures, residual stresses during monopass fillet welding, effect of structural restraint intensity of final strain build up in butt joints, TIG welding of Ni-base superalloys, fracture mechanics of dissimilar weld pipe junctions or the question if it is necessary to consider residual stresses already in the design

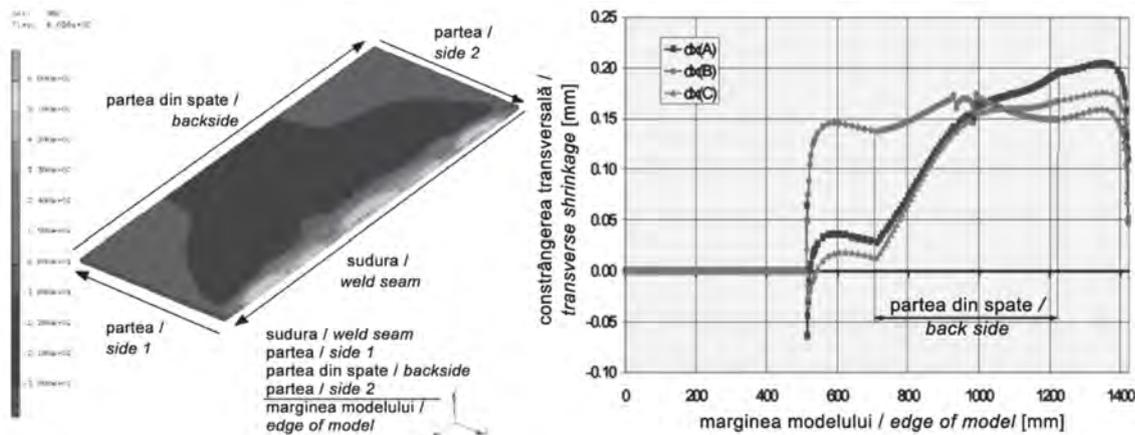


Figura 4. Stânga: Vedere generală a modelului și termenii folosiți în text. Graficul de contur arată tensiunile longitudinale de sudare după eliberarea din dispozitivul de prindere. Dreapta: Constrângerea transversală în jurul marginii modelului. Valoarea medie și maximă este similară în toate cazurile. Varianta pelerină arată cea mai omogenă distribuție (Enzinger, ș.a., NAW 2003) /

Figure 4. Left: Overview of the model and the terms used in the text. The contour plot shows the welding longitudinal stresses after releasing the clamping device. Right: Transverse shrinkage around the edge of the model. The mean and maximum value is similar in all cases. The pilgrim variant shows the most homogenous distribution. [Enzinger, NAW 2003]

care se adresează la subiectelor precum predicția distorsiunilor în structurile subțiri mari, a tensiunilor reziduale în timpul sudurii în colț dintr-o singură trecere, efectului intensității constrângerii structurii la deformația finală stabilită în îmbinările cap la cap, a sudurii WIG a super-aliajelor pe bază de nichel, a mecanicii ruperii îmbinărilor de conducte din materiale disimilare sau problemei dacă este necesară considerarea tensiunilor reziduale

stage of components. The latter has been discussed in detail in reference [Enzinger, NAW 2003], see Figure 4.

2.4. Hydrogen related phenomena

The role of hydrogen in cold cracking of high-strength structural material has regained considerable interest due to a recent

chiar în stadiul de proiectare a componentelor. Ulterior s-a discutat în detaliu în referința (Enzinger, NAW 2003), vezi figura 4.

component failure in a hydro-power facility. Especially construction and manufacturing of pressure pipes inside rocks is a current challenge. The papers presented in this section of

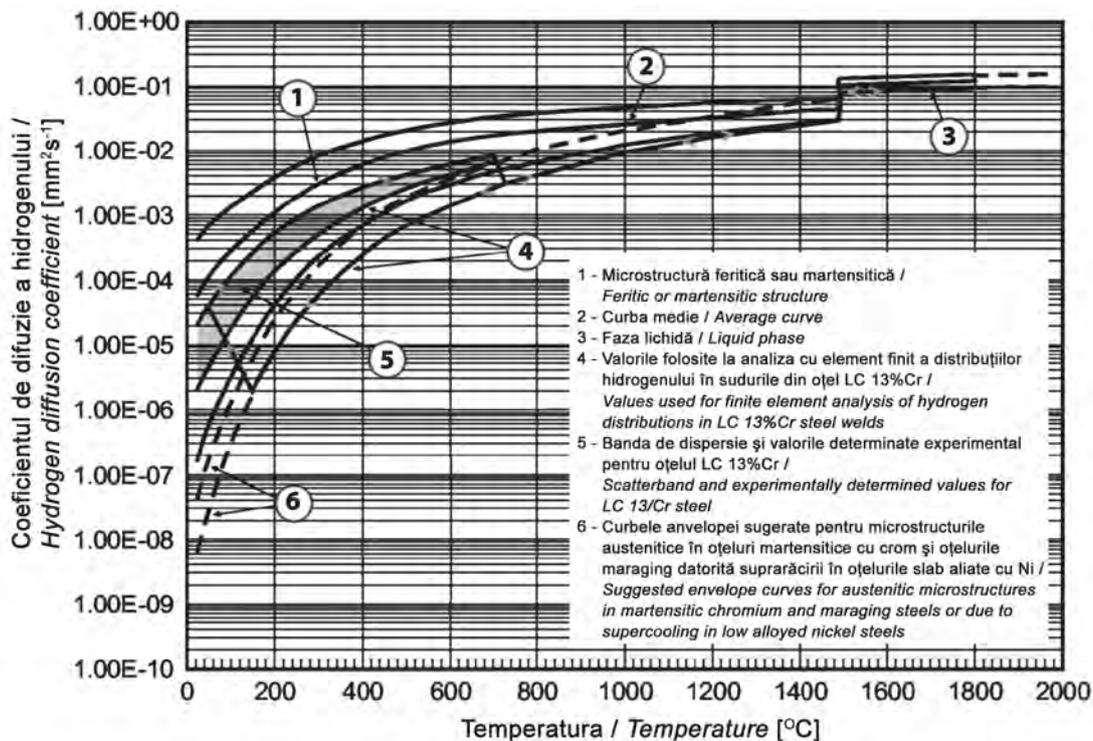


Figura 5. Rezultatele TRXRD ce arată fracția fazei β în funcție de timp la o poziție a fascicolului de raze-X la 4,5 mm de la centrul sudurii. Sunt observate transformarea spre faza β , topirea, solidificarea și re-transformarea până la α . (Henrikson, NAW 2003) /

Figure 5. TRXRD results showing the fraction β phase plotted versus time at an x-ray position 4.5 mm from the center of the weld. Transformation to β , melting, solidification, and back transformation to α are all observed [Bollinghaus et al., NAW 2003]

2.4. Fenomene legate de hidrogen

Rolul hidrogenului în fisurarea la rece a materialelor structurale de înaltă rezistență a recăpătat un interes considerabil datorită unei recente cedări a unei componente într-un utilaj hidro-energetic. În special construcția și fabricația conductelor sub presiune în interiorul stâncilor este o provocare curentă. Lucrările prezentate în această secțiune a NAW cuprind două analize a cunoștințelor curente privind hidrogenul în suduri precum și o lucrare care se ocupă cu tratamentul termic post-sudare a sudurilor din oțel supermartensitic. O lucrare tratează simularea încercării TEKKEN pentru determinarea susceptibilității la fisurarea la rece asistată în mediu de hidrogen (HACC).

Câteva dintre concluziile trase la seminar au fost:

- Rolul hidrogenului asupra fisurării la rece este legat direct de interacțiunile sale cu componentele și microstructura și cu starea de tensiune-deformație la nivel sub-microscopic. Capacitatea metodelor experimentale disponibile nu permite obținerea de valori sigure și aplicabile practic ale parametrilor ce caracterizează această interacțiune.

- Natura complicată a interacțiunii hidrogenului cu mediul de difuziune eterogen și în schimbare dinamică din îmbinările sudate impune dificultăți mari privind investigarea experimentală și privind descrierea dependențelor de temperatură a solubilității hidrogenului, a difuziei și captării sale.

- Slaba ajustare între nivelul submicroscopic a fenomenului de fisurare la rece și nivelul microscopic al soluțiilor

NAW comprise of two reviews of the current knowledge on hydrogen in welds as well as one paper addressing post weld heat treatment of super-martensitic steel welds. One paper deals with the simulation of the TEKKEN test for determination of the hydrogen assisted cold cracking (HACC) susceptibility.

Some of the hydrogen-related conclusions drawn at the seminar were:

- The role of hydrogen on cold cracking is directly related to its interactions with the components of microstructure and with the local stress-strain state on sub-microscopic level. The capacity of the available experimental methods does not allow obtaining reliable and practically applicable values of the parameters, characterising this interaction.

- The complicated nature of hydrogen interaction with the heterogeneous and dynamically changing diffusion medium in welded joints imposes substantial difficulties on the experimental investigating and describing the temperature dependencies of hydrogen solubility, diffusion and trapping.

- The misfit between the sub-microscopic level of cold cracking phenomenon and the microscopic level of numerical solutions for hydrogen behaviour is one of the main reasons for the unsatisfactory application of the complex numerical modelling in determining safe welding conditions.

- In order to obtain reliable results for avoiding hydrogen

numerice pentru comportarea hidrogenului este una dintre principalele motive de aplicare nesatisfăcătoare a modelării numerice complexe în determinarea condițiilor de sudare sigure.

- Pentru obținerea de rezultate sigure pentru evitarea fisurării la rece asistate în mediu de hidrogen în componentele sudate din oțel, analizele termice, structurale și de hidrogen trebuie cuplate convingător.

assisted cold cracking in welded steel components, thermal, structural and hydrogen analyses have to be coupled conclusively.

- Thermal cycle effects resulting from multi-run welding significantly influence the behaviour of stress-strain distribution in the weld. The thermal cycle together with restraint effects cause a contrary characteristic of stress-strain distribution in the weld metal centre and the remote regions from the weld bead. Such effects are

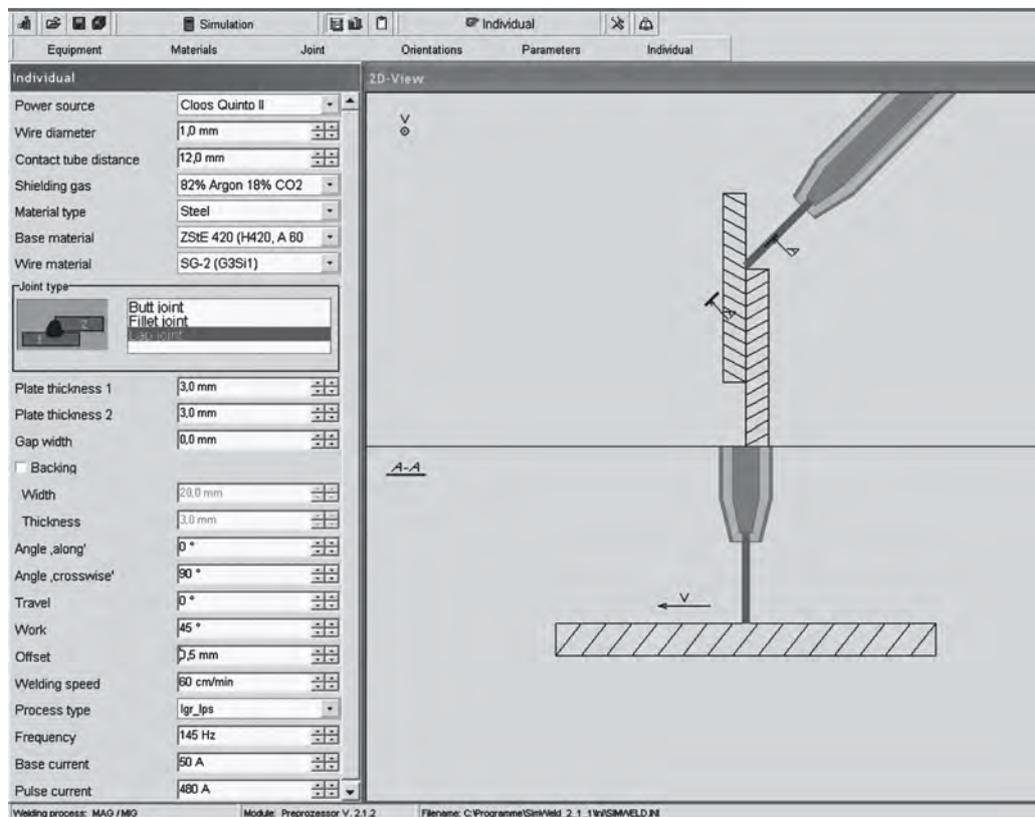


Figura 6. Preprocesorul SimWeld la sudarea GMA. Folosirea opțiunii „Individual” sunt selectați de către utilizator parametri relevanți și care se modifică des, care pot fi combinați împreună (Dilthey ș.a., NAW 2003) /

Figure 6. SimWeld Preprocessor for GMA-welding. Using the option „Individual”, the relevant and often changing parameters selected by user can be combined together in one window (Dilthey et al., NAW 2003)

- Efectele ciclului termic ce rezultă din sudarea cu treceri multiple influențează semnificativ comportarea distribuției tensiune-deformație în sudură. Ciclul termic împreună cu efectele constrângerii provoacă o caracteristică contrară a distribuției tensiune-deformație în centrul metalului sudurii și în regiunile îndepărtate de cordonul de sudare. Asemenea efecte sunt investigate obișnuit în continuare pentru a înțelege cumularea tensiune - deformație în timpul sudării și răcirii în componentele reale.

- Concentrația de hidrogen dintr-o trecere precedentă depinde semnificativ de distanța de difuziune față de stratul următor. Astfel, efectele geometrice asupra profilului de concentrare a hidrogenului trebuie să fie considerate adecvate în analizele de difuziune a hidrogenului.

- Până în prezent pentru reducerea durtății, tratamentul termic post-sudare de scurtă durată la temperaturi între 600° și 650°C cu durată de revenire între 10 și 15 minute reduce semnificativ concentrarea locală de hidrogen în sudurile din oțel inoxidabil super-martensitic și este mult mai eficient pentru îndepărtarea hidrogenului decât recoacerea de înmuiere tipică între 200° și 250°C timp de mai multe ore.

currently investigated further to understand the stress-strain build up during welding and cooling in real components.

- The hydrogen concentration in a previous pass significantly depends on the diffusion distance to the subsequent layer. Thus, the geometrical effects on the hydrogen concentration profile have to be considered appropriately in hydrogen diffusion analyses.

- Up to the present for hardness reduction, applied short-term post weld heat treatment at temperatures between 600 and 650°C for the tempering duration in the range of 10 to 15 minutes also significantly reduces the local hydrogen concentration in supermartensitic stainless steel welds and is much more effective for hydrogen removal than typical soaking at temperatures between 200 and 250°C for several hours.

2.5. Special welding processes

In recent times, alternative welding processes apart from traditional arc welding gain more and more importance. Driven by cost and weight reduction in automotive industry, resistance spot

2.5. Procese de sudare speciale

În acest moment procesele de sudare alternative în afară de sudarea tradițională cu arcul electric câștigă o importanță din ce în ce mai mare. Condușă de reducerea costului și a greutateii în industria automobilelor, sudarea în puncte prin rezistență electrică, sudarea hibridă (cu arc electric și fascicul laser) sau sudarea prin frecare cu element rotitor sunt în prezent tehnici de sudare comune. Ultimele procedee conțin printre altele subiecte importante, analize în profunzime ale stării domeniului pentru metode în analize numerice ale sudării prin frecare cu element rotitor precum și sudarea în puncte prin rezistență.

2.6. Modelarea abordărilor și programe de calcul

Una dintre tehnicile matematice moderne care a găsit calea sa în NAW este abordarea problemei reciproce. În acest sens este descris un proces fizic printr-un model cât mai simplu posibil (și cât de complicat este necesar). Bazat pe acest model procesul investigat este simulat în direcția înainte. Predicțiile calculelor sunt apoi comparate cu datele experimentale. În final în direcția înapoi parametrii de intrare sunt ajustați astfel încât să se poată obține cea mai bună reprezentare a datelor experimentale. La mitingul NAW 2001 V. Karkhin a câștigat primul Premiu pentru cea mai bună lucrare Keneth Easterling al IIS. La ultimul miting NAW din 2003 s-a arătat că această abordare este acum stabilită în comunitatea științifică ca o metodă utilă și puternică de rezolvare a problemelor cuplate puternic și neliniare. NAW 2003 a arătat de asemenea că software-ul de calcul pentru simulare, de exemplu procesele de sudare GMA (cu arc în gaz) ale oțelului și aluminiului sunt acum maturizate într-un mod în care aceste programe pot fi o unealtă valoroasă și de ajutor în practica zilnică de sudare (vezi figura 6.).

3. Rezumat și perspective

Recentul seminar NAW a dovedit pentru multe exemple că „Analiza numerică a Sudabilității” este o tehnică cheie în cercetarea și dezvoltarea sudării și îmbinării. Progresul major în aproape toate ariile acestui domeniu a fost demonstrat și NAW a devenit o unealtă vitală a cercetării în industrie. Există o concordanță comună privind faptul că NAW este o unealtă indispensabilă și că este necesară o dezvoltare în continuare a diferitor tehnici numerice.

Cel de-al optulea Seminar de „Analiza numerică a Sudabilității” va avea loc între 25 și 27 Septembrie 2006. La fel ca seminariile precedente acest eveniment va aduna oamenii de știință din industrie și mediul academic pentru a discuta stadiul curent și dezvoltarea viitoare a NAW (<http://iws.tuGraz.at/seQQau.html>).

Lucrare prezentat la „Primul Congres IIW sud-est european de sudare”, Timișoara, mai 2006

welding, hybrid welding (electric arc and laser beam) or friction stir welding are common welding techniques nowadays. The latest proceedings contain, among other hot topics, in-depth reviews of the state-of-the-art methods in numerical analysis of friction stir welding as well as resistance spot welding.

2.6. Modelling approaches and computer programs

One of the modern mathematical techniques that have found its way into NAW is the inverse-problem approach. In this sense, a physical process is described by an as-simple-as-possible (and as-complicated-as-necessary) model. Based upon this model, the process under investigation is simulated in the forward direction. The predictions of the calculations are then compared with experimental data. Finally, in the backward direction, the input parameters are adjusted such that a best-possible representation of the experimental data can be obtained. At the NAW 2001 meeting, V. Karkhin et al. have been awarded the first ever IIW Kenneth Easterling Best Paper Award. The last meeting 2003 showed that this approach is now established in the scientific community as a useful and powerful method to solve highly non-linear and strongly coupled problems. NAW 2003 has also shown that computer software for simulation of, e.g., gas-metal-arc welding processes of steel and aluminium has now matured in a way that these programs can be a valuable and helpful tool in daily welding practice (see Figure 6).

3. Summary and outlook

The recent seminar NAW has proven on many examples that ‘Numerical Analysis of Weldability’ is a key technique in welding and joining research and development. Major progress in almost all areas of this field has been demonstrated and NAW has become a vital tool of research in industry. There is common agreement that NAW is an indispensable tool and further development of the various numerical techniques is necessary.

The 8th Seminar „Numerical Analysis of Weldability” will take place between 25th and 27th of September 2006. Like the previous seminars, this event will bring together leading scientists from industry and academics to discuss state-of-the-art and future development of NAW (<http://iws.tuGraz.at/seQQau.html>).

Bibliografie / References

- [1]. V.A. Karkhin, A.S. Ilyin, V.V. Plochikhine, H.W. Bergmann: Inverse Modelling of Fusion Welding Process, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6, Eds. H. Cerjak, H.K.D.H. Bhadeshia, Institute of Materials, London, Book 784, (2002), p. 1017.
- [2]. A. Kumar, W. Zhang, C.-H. Kim, T. DebRoy: A Smart Bi-directional Model of Heat Transfer and Free Surface Flow in Gas Metal Arc Fillet Welding for Practicing Engineers, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7, Eds. H. Cerjak, H.K.D.H. Bhadeshia, E. Kozeschnik, Verlag der Technischen Universität Graz, (2005), p. 3.

Paper presented at The 1st IIW South-East European Welding Congress, Timisoara, May 2006

