

CERCETARE-DEZVOLTARE-INOVAR-PROIECTARE  
RESEARCH-DEVELOPMENT-INNOVATION-DESIGN

## Consolidarea elementelor structurilor metalice solicitate la oboseală utilizând compozite polimerice ranforsate cu fibre de carbon (CFRP)

### Steel structures elements under fatigue loading reinforcement using Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)

Ciprian Bratu<sup>1,2\*</sup>, Dorin Radu<sup>1</sup>, Radu Băncilă<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitatea Transilvania din Braşov, Facultatea de Construcţii

<sup>2</sup> Universitatea Politehnica Timişoara, Şcoala doctorală de Studii Inginereşti

<sup>3</sup> Universitatea Politehnica Timişoara, Facultatea de Construcţii

#### Rezumat

Lucrarea prezintă o analiză a stadiului cercetărilor în domeniul consolidării elementelor structurilor metalice cu ajutorul compozitelor ranforsate cu fibre de carbon (CFRP), relevând importanţa subiectului cât şi rezultatele studiilor prezentate. Rezultatele cercetărilor analizate în acest articol evidenţiază în mod constant potenţialul compozitelor CFRP de a îmbunătăţi semnificativ comportamentul la oboseală şi de a prelungi durata de viaţă a structurilor sudate din oţel, în mod deosebit, prin tehnici de consolidare bazate pe aplicarea externă. Studiile de caz din practică întăresc fezabilitatea şi beneficiile utilizării CFRP în aplicaţii industriale variate. Deşi există în continuare provocări şi limitări, precum costurile ridicate şi absenţa unor standarde sau norme de proiectare dedicate, eforturile continue de cercetare şi dezvoltare contribuie activ la depăşirea acestor obstacole şi pregătesc terenul pentru o adoptare mai largă a acestei tehnologii.

#### Cuvinte cheie

Compozite polimerice ranforsate cu fibre de carbon, structuri metalice, îmbinări sudate, încărcarea din oboseală

#### Abstract

The paper presents an analysis of the state of research in the field of steel structures elements strengthening using carbon fiber reinforced composites (CFRP), highlighting the importance of the subject as well as the results of the presented studies. The research results analysed in this article consistently highlight the potential of CFRP composites to significantly improve the fatigue behaviour and extend the service life of welded steel structures, in particular, through strengthening techniques based on external application. Practical case studies reinforce the feasibility and benefits of using CFRP in various industrial applications. Although there are still challenges and limitations, such as high costs and the absence of dedicated design standards or norms, continuous research and development efforts actively contribute to overcoming these obstacles and pave the way for a wider adoption of this technology.

#### Keywords

Carbon fibres reinforced polymers, steel structures, welded joints, fatigue loading

## 1. Introducere

Aplicarea compozitelor polimerice ranforsate cu fibre de carbon (CFRP) pentru reabilitarea şi consolidarea structurilor metalice sudate a atras un interes din ce în ce mai mare datorită proprietăţilor mecanice şi chimice superioare, pe care acest sistem de consolidare şi reabilitare îl oferă. Printre cele mai im-

## 1. Introducere

The application of the polymeric composites that are the Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRP) for the rehabilitation and strengthening of welded steel structures has attracted increasing interest due to the superior mechanical and chemical properties offered by this strengthening and rehabilitation

portante proprietăți pe care le posedă acest sistem de consolidare, pot fi menționate atingerea unui raport rezistență/greutate ridicat, rezistența deosebită la coroziune sau îmbunătățirea comportamentului la oboseală. Factorul principal care determină necesitatea consolidării unei structuri din oțel îl reprezintă deficiența structurală, care, în ingineria civilă, poate apărea fie ca urmare a schimbării modului de exploatare a structurii, fie din cauza degradării progresive care apare odată cu trecerea timpului.

Schimbările care intervin în modul de exploatare, în mod obișnuit, includ creșterea încărcărilor variabile, creșterea încărcărilor permanente, modificări ale traseului de transmitere a încărcărilor sau impunerea unor noi cerințe privind regimul de solicitare (de exemplu creșterea traficului, în cazul podurilor). În ceea ce privește degradarea structurală, cele mai frecvente cauze sunt coroziunea, oboseala materialului, evenimente accidentale și erorile de proiectare sau execuție. Un factor deosebit de important care contribuie la degradarea structurilor metalice este coroziunea. Cu toate că, este cel mai frecvent întâlnită la elementele metalice moderne cu pereți subțiri, acest fenomen afectează și oțelurile utilizate în structurile existente cu vechime în exploatare. Oboseala materialului constituie a doua cauză, cea mai frecventă, a degradării structurale. Cedarea elementelor structurale cauzată de oboseală determină costuri economice semnificative, ca urmare a pagubelor materiale substanțiale, însă mai grav poate avea consecințe catastrofale din perspectiva pierderilor de vieți omenești. În domeniul ingineriei civile acest fenomen este observat în principal la structurile supuse unor solicitări ciclice repetate. Printre cele mai vulnerabile structuri la fenomenul de oboseală putem aminti podurile rutiere și feroviare, structurile de susținere a macaralelor, stăvilarele sau platformele marine (platformele offshore) [1].

Cunoașterea și înțelegerea profundă a proprietăților materialelor implicate în consolidarea structurilor metalice, în special a compozitelor polimerice armate cu fibre de carbon (CFRP), este esențială pentru proiectarea soluțiilor de consolidare eficiente și durabile. Interacțiunea dintre compozitele CFRP și materialul metalic de bază determină comportamentul structural global, influențând atât aderența la interfață, cât și transferul de eforturi. O abordare eficientă a consolidării cu materiale compozite CFRP a structurilor metalice nu poate ignora analiza integrată a proprietăților materialelor și a interacțiunii dintre acestea. Doar pe baza unei caracterizări detaliate se pot stabili strategii de

system. Among the most important properties of this strengthening system are its high strength-to-weight ratio, exceptional corrosion resistance, and improved fatigue performance.

The main factor that determines the need for strengthening a steel structure is structural deficiency which, in civil engineering, may arise either due to changes in the way the structure is used or as a result of progressive degradation over time.

Changes in the way the structure is operated typically include increases in variable loads, increases in permanent loads, alterations in the load transmission path, or the imposition of new loading requirements (such as increased traffic in the case of bridges). As for structural degradation, the most common causes are corrosion, material fatigue, hazard events, and design or execution errors.

A particularly important factor contributing to the degradation of metallic structures is corrosion.

Although most frequently encountered in modern thin-walled metal elements, this phenomenon also affects the steels used in existing structures. Material fatigue is the second most common cause of structural degradation.

Fatigue-induced failure of structural elements leads to significant economic costs due to substantial material damage, and more critically, it can have catastrophic consequences in terms of loss of human life. In civil engineering, this phenomenon is mainly observed in structures subjected to repeated cyclic loading. Among the most vulnerable structures to fatigue phenomenon are road and railway bridges, crane-supporting structures, sluice gates, and offshore platforms [1].

Deep knowledge and understanding of the properties of the materials involved in the strengthening of metallic structures, especially Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) composites, is essential for designing effective and durable strengthening solutions.

The interaction between CFRP composites and the base metallic material determines the overall structural behaviour, influencing both interface adhesion and stress transfer. An effective approach to strengthening metallic structures with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) composites must incorporate an integrated analysis of material properties and their interactions.

Only through the basis of a detailed characterization can safe, durable, and code-compliant strengthening strategies be developed, aligned with structural

consolidare sigure, durabile și conforme cu cerințele de performanță structurală și normativă.

În mod frecvent în situația în care se impune consolidarea unei structuri de cele mai multe ori avem de-a face cu structuri vechi, structuri care au fost realizate din materiale specifice perioadei în care au fost construite. Acest aspect poate constitui o provocare destul de mare deoarece determinarea proprietăților unor astfel de materiale este dificilă în special din cauza vechimii lor, a compoziției chimice sau a posibilei lipse a unei documentații. Din punct de vedere istoric, realizarea structurilor metalice se consideră că a început în 1778, odată cu realizarea podului pietonal de la Coalbrookdale. Se disting trei perioade principale: fonta, oțelul pudlat și oțelul moale (începând cu anul 1900). La început îmbinările s-au realizat cu ajutorul niturilor, iar sudura ca mijloc de îmbinare a fost introdusă abia la începutul sec. al XX-lea [1,2].

Pentru structuri din oțel pudlat și oțel moale timpuriu, solicitate la oboseală, sudarea nu este recomandată, iar pentru oțelul moale de la începutul secolului al XIX-lea, cu toate că îndeplinește cerințele standardului EN 10025 [3] și poate fi clasificat ca fiind sudabil - pe baza compoziției chimice - este recomandată efectuarea unor teste suplimentare pentru determinare sudabilității. Oțelurile utilizate în structuri sudate începând aproximativ cu anul 1966 respectă în totalitate condițiile tehnice generale de livrare prevăzute de Eurocoduri [2,4]. Standardul elvețian SIA269 [4] oferă o clasificare a materialelor vechi utilizate pentru sudură precum și proprietățile caracteristice ale acestora așa cum sunt prezentate în tabelul 1.

and regulatory performance requirements.

In many cases where structural strengthening is required, we are often dealing with older structures. These types of structures were built using materials specific to the period in which they were constructed. This aspect can pose a significant challenge, as determining the properties of such materials is difficult, particularly due to their age, chemical composition, or the possible lack of documentation.

Historically, the construction of metallic structures is believed to have begun in 1778 with the completion of the pedestrian bridge at Coalbrookdale. Three main phases are distinguished: cast iron, wrought iron, and mild steel (starting around 1900).

Initially, joints and assemblies were made using rivets, while welding as a joining method was introduced only at the beginning of the 20th century [1,2].

For wrought iron and early mild steel subjected to fatigue loading, welding is not recommended. Although 19th-century mild steel may meet the requirements of the EN 10025 standard [3] and can be classified as weldable based on its chemical composition, additional welding tests are recommended. Steels used in welded structures from 1966 onward fully comply with the general technical delivery conditions specified by the Eurocodes [2,4].

The Swiss standard SIA 269 [4] provides a classification of historical materials used for welding, along with their characteristic properties, as presented in table 1.

**Tabelul 1.** Clasificarea și proprietățile caracteristice ale materialelor vechi utilizate la sudură, adaptat după SIA269 [4]

**Table 1.** Classification and characteristic properties of old materials used in welding, adapted from SIA269 [4]

Perioada în uz <sup>1)</sup> / In use period <sup>1)</sup>	$f_{ukE}$ <sup>2)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
1900-1924 <sup>3)</sup>	300
1925-1955 <sup>4)</sup>	360
începând cu 1956 <sup>4)</sup> / since 1956 <sup>4)</sup>	cel puțin egal cu materialul de bază / at least equal to the base material

<sup>1)</sup> Etapa principală de fabricație / The main manufacturing stage;  
<sup>2)</sup> Valori orientative ale rezistenței materialelor vechi de sudură, utilizate în lipsa documentației sau a testelor experimentale / Strength values for old weld materials to be applied where documents are unreliable, and no additional tests are carried out;  
<sup>3)</sup> Denumirea convențională a materialelor istorice de sudură: „fier de cărbune suedez” sau „fier de cărbune” / Designation of old weld materials: “Swedish charcoal iron” or “charcoal iron”;  
<sup>4)</sup> An important, publicarea noilor coduri SIA în 1956 / Key year, publication of the new SIA codes in 1956;  
 $f_{ukE}$  - valoarea caracteristică a rezistenței la întindere a materialului de adaos de sudură /  $f_{ukE}$  - the characteristic value for the tensile strength of the welding filler.

Compozitele polimerice ranforsate cu fibre de carbon (CFRP) sunt materiale compozite formate din fibre de carbon cu rezistență ridicată, încorporate într-o matrice polimerică, cel mai adesea o rășină epoxidică. Această combinație unică de componente conferă

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) composites are composite materials formed from high-strength carbon fibers embedded in a polymer matrix, most often an epoxy resin. This unique combination of components gives the

compozitelor caracteristici mecanice excepționale, ceea ce le face un material extrem de atrăgător pentru aplicațiile de consolidare structurală. Fibrele de carbon în sine prezintă o rezistență la întindere și o rigiditate remarcabile, depășind cu mult valorile caracteristice ale oțelului convențional, în timp ce matricea sau polimerul prezintă rezistență și modul de elasticitate scăzute. Atunci când fibrele sunt aliniat și legate împreună de matricea polimerică, materialul compozit rezultat dobândește proprietăți unidirecționale de rezistență și rigiditate, care pot fi adaptate cerințelor specifice de solicitare [1].

În mod uzual, la consolidarea și reabilitarea structurilor, cele mai utilizate fibre pentru fabricarea materialelor compozite FRP sunt: fibrele de carbon, fibrele de aramidă și fibrele de sticlă, însă au fost utilizate și alte tipuri de fibre precum, fibrele lemnoase, hârtia sau fibre de azbest. În consecință materialele compozite ranforsate cu fibre pot fi obținute pe căi naturale sau pot fi fabricate artificial, fiind sustenabile. În prezent principala alegere în cazul unei consolidări cu materiale compozite polimerice sunt fibrele de carbon. Totuși, alegerea tipului de fibre, în cazul unei consolidări depinde de mai mulți factori, cum ar fi materialul elementului supus consolidării, cerințele de rezistență și rigiditate, precum și considerentele economice legate de costurile asociate. Din punct de vedere economic, cea mai accesibilă opțiune o reprezintă fibrele de sticlă, urmate de fibrele de aramidă, în timp ce fibrele de carbon sunt cele mai costisitoare [1,5,6,7].

composites exceptional mechanical characteristics, making them a highly attractive material for structural strengthening applications.

The carbon fibers themselves exhibit remarkable tensile strength and stiffness, far exceeding the characteristic values of conventional steel, while the matrix or polymer exhibits low strength and modulus of elasticity. When the fibers are aligned and bonded together by the polymer matrix, the resulting composite material acquires unidirectional strength and stiffness properties that can be adapted to specific loading requirements [1].

Usually, in the strengthening and rehabilitation of structures, the most commonly used fibers for manufacturing FRP composite materials are: carbon fibers, aramid fibers, and glass fibers. However, other types of fibers have also been used, such as wood fibers, paper, or asbestos fibers.

Consequently, fiber-reinforced composite materials can be obtained naturally or can be manufactured artificially. Currently, the primary choice for structure strengthening by means of polymer composite materials is carbon fibers. However, the choice of fiber type when reinforcing steel structures depends on several factors, such as the material of the element being strengthened, the strength and stiffness requirements, and economic considerations related to the associated costs. From an economic point of view, the most affordable option is glass fibers, followed by aramid fibers, while carbon fibers are the most expensive [1,5,6,7].

**Tabelul 2.** Comparație între fibre și oțel, adaptat după CNR-DT 200 [6]  
**Table 2.** Comparison between fibers and steel, adapted from CNR-DT 200 [6]

	Modulul de elasticitate Modulus of elasticity E	Rezistența la întindere Tensile strength $\sigma_r$	Deformația la rupere Strain at failure $\epsilon_r$	Coefficientul de expansiune termică Coefficient of thermal expansion $\alpha$
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ]
E-glass	70 - 80	2000 - 3500	3.5 - 4.5	5 - 5.4
S-glass	85 - 90	3500 - 4800	4.5 - 5.5	1.6 - 2.9
Carbon (high modulus)	390 - 760	2400 - 3400	0,5 - 0.8	-1.45
Carbon (high strength)	240 - 280	4100 - 5100	1.6 - 1.73	-0.6 - 0.9
Aramid	62 - 180	3600 - 3800	1.9 - 5.5	-2
Oțel Steel	206	250 - 400 (curgere) (yield) 350 - 600 (rupere) (failure)	20 - 30	10.4

Pentru fabricarea materialelor compozite polimerice ranforsate cu fibre (Fibre Reinforced Polymers- FRP) s-au dezvoltat diverse metode și procedee tehnologice, însă două dintre acestea se disting ca fiind

Various methods and technological processes have been developed for the manufacturing of Fibre Reinforced Polymer (FRP) composites, but two stand out as the most commonly used: pultrusion and

cel mai frecvent întâlnite: pultruziunea și utilizarea fibrelor pre impregnate cu rășină (prepreg). Cu toate acestea indiferent de metoda folosită, polimerul din compoziția materialului compozit acționează, de asemenea, ca adeziv între materialul compozit și elementele structurale [1]. În tabelul 2 sunt prezentate comparativ principalele caracteristici mecanice ale unor tipuri de fibre utilizate în inginerie (fibrele de sticlă, carbon, aramidice) și ale oțelului.

## 2. Analiza îmbinărilor sudate solici-tate la oboseală

Îmbinările realizate prin sudură în cazul structurilor metalice reprezintă puncte critice întrucât sunt supuse concentrărilor de tensiuni, aspect care le face deosebit de sensibile la sollicitările de oboseală. Degradările cauzate de sollicitările din oboseală asupra componentelor structurale au un caracter progresiv, chiar dacă tensiunile care generează aceste degradări se află sub limita elastică. Inițierea și propagarea fisurilor în zonele sudate sunt influențate de mai mulți factori, printre cei mai importanți fiind: geometria îmbinării, calitatea sudurii, prezența defectelor (pori, incluziuni, fisuri de solidificare), tipul sollicitării (axială, de încovoiere, torziune), precum și condițiile de mediu [8].

Pornind de la ideea că oboseala în structurile sudate apare aproape exclusiv în zona sudurilor, unde concentrările de tensiuni, imperfecțiunile geometrice și tensiunile reziduale sunt majore, Fricke [9] trece în revistă principalele metode din practica inginerescă pentru estimarea duratei de viață la oboseală. Autorul [9] clasifică metodele de analiză a îmbinărilor sudate, la oboseală, în următoarele categorii principale:

- Analiza pe baza tensiunii nominale, abordare bazată pe curbe S-N standardizate și clase de detalii;
- Analiza pe baza tensiunii de tip hot-spot care ia în considerare efectele de discontinuitate geometrică;
- Analiza pe baza tensiunilor sau a intensității tensiunilor locale, ce ia în considerare tensiunile elastice locale și factorii de intensitate ai tensiunilor;
- Analiza pe baza deformațiilor locale ce consideră deformațiile elasto-plastice locale;
- Analiza pe baza propagării fisurilor, cu ajutorul mecanicii ruperii și studiul propagării fisurilor existente.

O clasificare similară o întâlnim și în lucrarea lui Radaj et al. [10], care, în mod asemănător clasifică metodele locale în trei categorii: concepte de tensiune structurală, tensiune sau deformație în creșterea și mecanică a ruperii, fiecare cu subvariante dedicate evaluării diferite-

the use of resin pre-impregnated fibers (prepreg). Regardless of the method used, however, the polymer within the composite also acts as an adhesive between the composite material and the structural elements [1].

Table 2 provides a comparative overview of the main mechanical properties of different types of engineering fibers (such as glass, carbon, and aramid fibers) and steel.

## 2. Analysis of welded joints subjected to fatigue

Welded joints in metallic structures represent critical points as they are subject to stress concentrations, an aspect that makes them particularly sensitive to fatigue loading. Degradation caused by fatigue loading on structural components has a progressive nature, even when the stresses causing it are below the elastic limit. The nucleation and growth of cracks in welded areas are influenced by several factors, among the most important being: the geometry of the joint, the quality of the weld, the presence of defects (such as pores, inclusions, solidification cracks), the type of loading (axial, bending, torsion), as well as environmental conditions [8].

Based on the idea that fatigue in welded structures occurs almost exclusively in the weld area, where stress concentrations, geometric imperfections, and residual stresses are predominant, Fricke [9] reviews the main methods used in engineering practice for estimating fatigue life. The author [9] classifies the methods for fatigue analysis of welded joints into the following main categories:

- Nominal stress approach, an approach based on standardized S-N curves and detail categories;
- Structural or hot-spot stress approach, which considers the effects of geometric discontinuity;
- Notch stress and notch intensity approach, which considers local elastic stresses and stress intensity factors;
- Notch strain approach, which considers local elasto-plastic strains;
- Crack propagation analysis, using fracture mechanics and the study of the propagation of existing cracks.

A similar classification is also found in the work of Radaj et al. [10], which similarly classifies local methods into three main categories: structural stress concepts, notch stress or strain, and fracture mechanics, each with sub-variants dedicated to assessing

lor tipuri de suduri (suduri continue sau punctiforme). Un aspect esențial, în momentul evaluării duratei de viață la oboseală, îl constituie dificultatea separării fazelor de inițiere și propagare a fisurilor. Majoritatea metodelor bazate pe curbe S-N sunt calibrate pe probe mici unde inițierea fisurii este greu de identificat, rezultând astfel aplicabilitatea limitată la structuri reale. Abordările locale sunt evidențiate ca fiind cele care oferă cea mai mare acuratețe în evaluarea detaliilor complexe și a efectelor de geometrie locală. Însă nu trebuie neglijate dezavantajele pe care le au aceste abordări cum ar fi necesitatea unei mari puteri de calcul și necesitatea unor date, privind proprietățile materialelor foarte precise [9,11]. De-asemenea în estimarea duratei de viață la oboseală este deosebit de importantă influența unor factori critici precum: efectul grosimii plăcii, stările de tensiune multiaxiale, alinierea greșită a elementelor sudate și prezența tensiunilor reziduale de sudură. Aceste efecte sunt tratate diferit de fiecare metodă în parte, ceea ce poate conduce la discrepanțe în predicția duratei de viață. De exemplu, efectul grosimii este inclus în mod explicit doar în unele metode, în timp ce în altele necesită corecții empirice [11]. Totodată, este important să menționăm utilizarea metodelor numerice pentru evaluarea oboselii îmbinărilor sudate, având în vedere că acest domeniu a înregistrat progrese semnificative în ultima perioadă. Modelarea numerică prin Metoda Elementelor Finite (FEM) este o unealtă indispensabilă pentru analiza detaliată a distribuției tensiunilor în zona sudurii. În special, metodele bazate pe evaluarea tensiunilor structurale echivalente (hot-spot stress method) sau a tensiunilor efective locale (effective notch stress) sunt utilizate pentru a estima durata de viață la oboseală într-un mod realist [12]. Este esențial ca proiectarea îmbinărilor sudate să se facă ținând cont de principiile ingineriei oboselii, incluzând utilizarea detaliilor favorabile (ex. tranziții lineare), reducerea defectelor prin controlul calității sudurii și, acolo unde este necesar, aplicarea tratamentelor post-sudare (de ex. prelucrare mecanică, peening sau tratamente termice) pentru creșterea duratei de viață la oboseală [10,13].

### **3. Consolidarea elementelor din oțel supuse la oboseală cu ajutorul polimerilor armați cu fibră de carbon (CFRP)**

Una dintre cele mai cuprinzătoare analize asupra

different types of welds (continuous or spot welds). An essential aspect, when evaluating fatigue life, is the difficulty of separating the crack initiation and propagation phases.

Most methods based on S-N curves are calibrated on small samples where crack initiation is difficult to identify, thus resulting in limited applicability to real structures. Local approaches are highlighted as those that offer the highest accuracy in evaluating complex details and local geometry effects.

However, the disadvantages of these approaches should not be neglected, such as the need for high computing power and the need for very precise material property data [9,11].

Also, in estimating fatigue life, the influence of critical factors such as the plate thickness effect, multiaxial stress states, misalignment of welded elements, and the presence of residual welding stresses is particularly important.

These effects are treated differently by each method, which can lead to discrepancies in the prediction of fatigue life. For example, the thickness effect is explicitly included in only some methods, while in others it requires empirical corrections [11].

Furthermore, it is important to mention the use of numerical methods for the fatigue assessment of welded joints, given that this field has seen significant progress in recent times.

Numerical modelling using the Finite Element Method (FEM) is an indispensable tool for the detailed analysis of stress distribution in the weld area. In particular, methods based on the evaluation of equivalent structural stresses (hot-spot stress method), or effective local stresses (effective notch stress) are used to estimate fatigue life in a realistic manner [12].

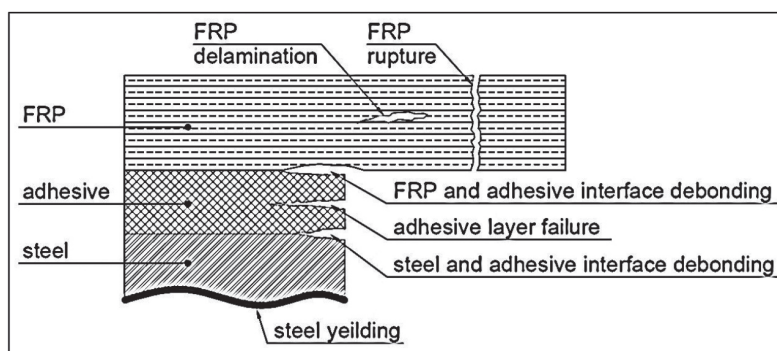
It is essential that the design of welded joints be carried out taking into account the principles of fatigue engineering, including the use of favourable details (e.g. linear transitions), the reduction of defects through weld quality control, and, where necessary, the application of post-weld treatments (e.g. mechanical machining, peening, or heat treatments) to increase fatigue life [10,13].

### **3. Strengthening of steel elements subject to fatigue using Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)**

One of the most comprehensive analyses of the

stadiului actual al cercetării în domeniul consolidării și reabilitării structurilor din oțel cu materiale compozite FRP este cea realizată de Zhao și Zhang [14]. Această lucrare se concentrează pe trei direcții esențiale, dar insuficient tratate în literatura de specialitate anterior, și anume: comportamentul aderenței la interfața oțel-FRP, consolidarea elementelor din oțel tubulare și propagarea fisurilor de oboseală în sistemele de consolidare CFRP/oțel.

În ceea ce privește comportamentul aderenței CFRP la elementele din oțel sunt puse în discuție diverse metode de testare a aderenței, tipologii de cedare, precum și modele teoretice de predicție a rezistenței legăturii, incluzând relația legătură-lunecare. Un aspect important, al acestei lucrări, sunt posibilele moduri de cedare ale unui sistem de consolidare CFRP/oțel, supus la solicitări de întindere, propuse de autori. Acestea sunt prezentate în figura 1 după cum urmează: cedarea la interfața oțel-CFRP, cedarea coezivă a stratului de adeziv, cedarea la interfața CFRP/adeziv, delaminarea compozitelor CFRP, ruperea CFRP sau curgerea substratului metalic.



**Figura 1.** Vedere schematică a modurilor de cedare posibile, adaptat după [14]

**Figure 1.** Schematic view of possible failure modes, adapted from [14]

Pentru elementele tubulare din oțel, studiile analizate au demonstrat că aplicarea compozitelor CFRP îmbunătățește semnificativ comportamentul la compresiune și la încovoiere, în special prin limitarea flambajului local. De asemenea studiile experimentale au inclus și aplicabilitatea soluțiilor de consolidare cu materiale compozite FRP în medii marine, confirmând viabilitatea tehnologiei în condiții de mediu dificile. În ceea ce privește oboseala structurilor din oțel, autorii sintetizează cercetări care au demonstrat că aplicarea compozitelor CFRP direct peste zonele cu fisuri sau cu potențial de fisurare, reduce rata de propagare a fisurilor și prelungeste durata de viață la oboseală a componentelor. Totuși, s-a observat că eficiența este influențată de modulul de elasticitate al compozitelor, de grosimea stratului adezivului și aplicarea pre-tensionată a fâșiilor CFRP.

current state of research in the field of strengthening and rehabilitation of steel structures using FRP composite materials is that conducted by Zhao and Zhang [14]. This work focuses on three essential but previously underexplored areas in the specialized literature: the bond behaviour at the steel-FRP interface, the strengthening of tubular steel members, and the propagation of fatigue cracks in CFRP/steel strengthening systems.

Regarding the bond behaviour of CFRP to steel elements, various bond testing methods, failure typologies, and theoretical models for predicting bond strength, including the bond-slip relationship, are discussed.

An important aspect of this work is the possible failure modes of a CFRP/steel strengthening system subjected to tensile loads, as proposed by the authors. These are presented in figure 1 as follows: failure at the steel-CFRP interface, cohesive failure of the adhesive layer, failure at the CFRP/adhesive interface, delamination of the CFRP composites, rupture of the CFRP, or yielding of the metallic substrate.

For steel tubular elements, the analyzed studies have shown that the use of CFRP composites significantly improves compression and bending behavior, particularly by limiting local buckling. Experimental studies have also addressed the applicability of FRP composite strengthening solutions in marine environments, confirming the viability of the technology under harsh environmental conditions. Regarding fatigue of steel structures, the authors summarize research demonstrating that applying CFRP composites directly over cracked or crack-prone areas reduces crack propagation rates and extends the fatigue life of components. However, it was observed that the effectiveness is influenced by the elastic modulus of the composites, the thickness of the adhesive layer, and the application of prestressed CFRP strips. The authors conclude that there is a need for

Autorii concluzionează necesitatea dezvoltării unor modele de predicție mai exacte pentru interfața oțel-FRP, studii privind stabilitatea globală a elementelor consolidate și optimizarea modelării propagării fisurilor din oboseală.

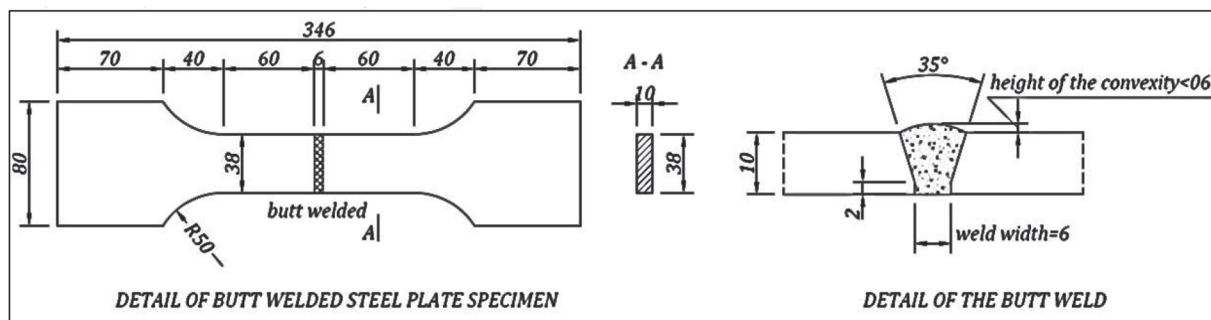
Analiza stadiului actual al cercetărilor realizată de Gholami et al. [15] se axează pe comportamentul sistemelor de consolidare oțel/CFRP în condiții de mediu agresiv. Autorii includ studii privind caracteristicile legăturii FRP/oțel, metodele de pregătire a suprafeței, consolidarea grinzilor metalice, modele de calcul analitice și efectul solicitărilor repetate. Un accent deosebit este pus pe comportamentul sistemelor de consolidare în condiții de mediu reale, precum: temperaturi ridicate, umiditate, expunerea în mediu salin, expunerea la radiații ultraviolete și la cicluri de îngheț-dezghet. Rezultatele sintetizate arată că principalul punct vulnerabil este stratul de adeziv epoxidic, a cărui rezistență și rigiditate scad semnificativ odată cu apropierea de temperatura de tranziție vitroasă ( $T_g$ ). În plus, expunerea îndelungată la apă sau umiditate duce la umflarea materialului compozit, pierderea capacității portante și reducerea temperaturii de tranziție vitroase,  $T_g$ . Autorii subliniază că testele accelerate de laborator nu reflectă fidel comportamentul real, motiv pentru care recomandă studii de durată în condiții naturale severe, precum climatul tropical sau marin.

Într-un studiu recent Tong et al. [16], au studiat experimental comportamentul îmbinărilor sudate cap la cap, în cazul tablelor din oțel solicitate la oboseală consolidate cu materiale compozite CFRP. Autorii au pornit de la ideea că deși utilizarea materialelor compozite pentru consolidarea structurilor metalice, a cunoscut în ultimul timp o atenție crescută, prea puțină atenție a fost acordată îmbinărilor cap la cap, una dintre cele mai des utilizate îmbinări sudate. Studiul experimental s-a axat pe două direcții principale: încercarea la oboseală și măsurarea tensiunilor geometrice „puncte fierbinți” (hot-spot stress). Au fost testate patru grupe de epruvete cu aceleași dimensiuni geometrice, toate cele patru grupe prezentând îmbinări sudate cap la cap și diverse configurații de aplicare a ranforsării cu fâșii CFRP (fără consolidare, cu fâșii aplicate pe o singură parte a epruvetei sau pe ambele părți). O atenție deosebit de importantă a fost acordată pregătirii suprafețelor epruvetelor, care au fost șlefuite și curățate cu alcool înainte aplicării materialelor compozite. Dimensiunile și forma epruvetelor testate sunt prezentate în figura 2, adaptată după lucrarea lui Tong et al. [16]:

the development of more accurate prediction models for the steel-FRP interface, studies on the global stability of strengthened elements, and optimization of fatigue crack growth modeling.

The analysis of the current state of research conducted by Gholami et al. [15] focuses on the behavior of steel/CFRP strengthening systems in aggressive environmental conditions. The authors include studies on the bond characteristics of FRP/steel, surface preparation methods, the strengthening of metallic beams, analytical calculation models, and the effect of repeated loading. A particular emphasis is placed on the behavior of strengthening systems in real environmental conditions, such as high temperatures, humidity, exposure to saline environments, exposure to ultraviolet radiation, and freeze-thaw cycles. The synthesized results show that the main vulnerable point is the epoxy adhesive layer, whose strength and stiffness decrease significantly as the glass transition temperature ( $T_g$ ) is approached. In addition, prolonged exposure to water or humidity leads to swelling of the composite material, loss of load-bearing capacity, and a reduction in the glass transition temperature,  $T_g$ . The authors emphasize that accelerated laboratory tests do not accurately reflect real behavior, which is why they recommend long-term studies in severe natural conditions, such as tropical or marine climates.

In a recent study, Tong et al. [16] experimentally investigated the fatigue behaviour of butt-welded joints in steel plates strengthened with CFRP composite materials. The authors started from the idea that although the use of composite materials for strengthening metallic structures has recently received increased attention, too little attention has been paid to butt joints, one of the most frequently used welded joints. The experimental study focused on two main directions: fatigue testing and the measurement of geometric 'hot-spot' stresses. Four groups of specimens with the same geometric dimensions were tested, all four groups featuring butt-welded joints and various configurations of CFRP strip application (without reinforcement, with strips applied on one side of the specimen, or on both sides). Particularly important attention was paid to the preparation of the specimen surfaces, which have been polished and cleaned with alcohol before the application of the composite materials. The dimensions and shape of the tested specimens are shown in figure 2, adapted from the work of Tong et al. [16]:



**Figura 2.** Dimensiunile și forma epruvetelor testate (dimensiuni în mm), adaptat după [16]  
**Figure 2.** Dimensions and shape of the tested specimens (dimensions in mm), adapted from [16]

Ambele tipuri de teste, măsurarea tensiunilor în puncte fierbinți cât și testul la oboseală s-au efectuat cu același dispozitiv servo hidraulic cu o capacitate de 250 kN. Proprietățile materialelor utilizate, atât compozitele cât și oțelul au fost determinate prin teste de laborator, iar rezultatele obținute au îndeplinit cerințele tehnice.

Din analiza rezultatelor obținute s-au concluzionat următoarele aspecte principale: cedarea în cazul tuturor epruvetelor s-a produs întotdeauna în substratul metalic în zona influențată termic (ZIT), fâșiile CFRP neavând nici o influență asupra modului de cedare sau a modificării locației acesteia. Durata de viață la oboseală a fost mărită în cazul consolidării cu CFRP însă aceasta depinde de configurația soluției de consolidare (aplicare pe o singură parte sau ambele părți ale epruvetei). Fâșiile CFRP au jucat două roluri în consolidarea sudurii, pe de-o parte au redus concentrările de tensiuni la rădăcina sudurii, iar pe de altă parte au redus extinderea propagării fisurii din oboseală, într-o anumită măsură.

Într-un studiu mai recent Amraei et al. [17] abordează problema diminuării proprietăților mecanice la nivelul zonelor influențate termic (ZIT) din oțelurile cu rezistență ultra-înaltă (Ultra-High Strength Steels, UHSS) sudate, propunând ca soluție consolidarea cu plăci CFRP cu modul ultra-înalt (Ultra-High Modulus, UHM). Cu toate că în ultimul timp utilizarea CFRP în consolidarea structurilor metalice a devenit un subiect destul de bine documentat, aplicarea acestora pentru oțelurile UHSS este o direcție relativ nouă, cu provocări specifice legate de solicitările ridicate la interfața oțel/CFRP și de riscul de desprindere prematură.

Studiul experimental s-a efectuat în patru pași. În primul pas a fost confecționată o îmbinare sudată cap la cap, pentru care au fost adoptate două metode de sudare GMAW, respectiv sudură laser LW. Apoi au fost confecționate epruvete specifice testării la întindere, din plăcile sudate la pasul anterior. În pasul al treilea au fost aplicate soluțiile de consoli-

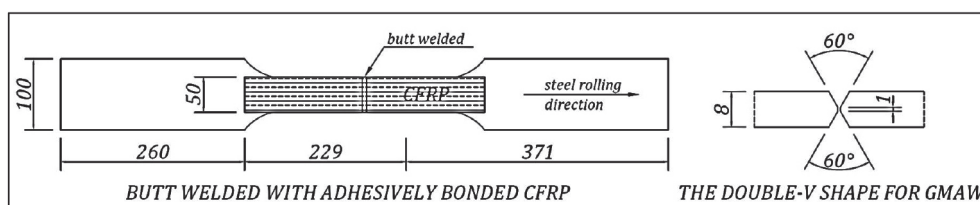
Both types of tests, stress measurement at hot spots and fatigue testing, were carried out using the same servo-hydraulic device with a capacity of 250 kN. The material properties of both the composites and the steel were determined through laboratory tests, and the obtained results met the technical requirements.

From the analysis of the results, the following main conclusions were drawn: failure in all specimens always occurred in the metal substrate within the heat-affected zone (HAZ), with the CFRP strips having no influence on changing the failure mode or the location of the failure. Fatigue life was increased when strengthening with CFRP composites; however, this depended on the strengthening configuration (application on one side or both sides of the specimen). The CFRP strips played two roles in weld strengthening: on one hand, they reduced stress concentrations at the weld root, and on the other hand, they somewhat limited fatigue crack propagation.

In a more recent study, Amraei et al. [17] address the problem of the decrease in mechanical properties in the heat-affected zones (HAZ) of welded Ultra-High Strength Steels (UHSS), proposing reinforcement with Ultra-High Modulus (UHM) CFRP plates as a solution. Although the use of CFRP in strengthening metallic structures has recently become a fairly well-documented subject, its application to ultra-high strength steels, UHSS is a relatively new direction, with specific challenges related to high stresses at the steel/CFRP interface and the risk of premature debonding.

The experimental study was carried out in four steps. In the first step, a butt-welded joint was fabricated, for which two GMAW welding methods and LW laser welding were adopted. Then, specific tensile testing specimens were manufactured from the plates welded in the previous step. In the third step, the reinforcement solutions were applied, and in the

dare, iar în pasul final epruvetele au fost testate la întindere. În ceea ce privește materialele utilizate, pentru oțel au fost utilizate două tipuri de UHSS (S700 și S960), iar pentru compozite s-au utilizat laminate cu modul ultra-înalt CFRP, având valorile de 450 GPa pentru modulul de elasticitate, respectiv 1500 MPa pentru rezistența la întindere, conform datelor furnizate de producător. Epruvetele au fost alcătuite în diferite configurații: epruvete de control fără suduri, epruvete sudate fără CFRP și epruvete consolidate cu plăci CFRP aplicate de ambele fețe ale zonei sudate, utilizând adeziv epoxidic. În figura 3 sunt prezentate schematic epruvetele folosite în programul de testare. Testele s-au efectuat la oboseală pentru solicitări de întindere, aplicându-se un ecart de tensiuni de 594 MPa, iar pentru măsurarea distribuției de deformații a fost utilizat un sistem Digital Image Correlation (DIC).



**Figure 3.** Prezentare schematică a epruvetelor (dimensiuni în mm), adaptat după [17]

**Figure 3.** Schematic view of the specimens (dimensions in mm), adapted from [17]

Pe lângă testele experimentale, lucrarea include o simulare numerică detaliată cu elemente finite (FE) pentru a analiza starea de tensiuni în zona sudurii și legătura adezivă oțel/CFRP. Rezultatele confirmă că aplicarea consolidării cu CFRP menține zona influențată termic, ZIT, în domeniul elastic chiar și la sarcini maxime, sugerând un potențial important de creștere a duratei de viață la oboseală.

Rezultatele testelor la întindere arată o îmbunătățire de până la 32% a rezistenței la rupere și o creștere a rigidității cu până la 55% în cazul epruvetelor consolidate, comparativ cu epruvete de control fără suduri. În plus, analiza de microduritate a evidențiat o reducere semnificativă a durtății în zona ZIT pentru oțelul S960, în contrast cu oțelul S700, unde efectul sudurii a fost minim. În plus, metodele alternative precum High-Frequency Mechanical Impact (HFMI) și TIG-dressing (Tungsten inert gas), testate comparativ, nu au oferit îmbunătățiri semnificative ale capacității statice, ci doar o influență limitată asupra durtății superficiale.

Concluziile lucrării evidențiază faptul că aplicarea consolidării CFRP în cazul sudurilor oțelurilor UHSS este o metodă eficientă pentru restabilirea sau chiar îmbunătățirea capacității portante, fiind superioară metodelor tradiționale de post-procesare, în special

final step, the specimens were tested in tension. Regarding the materials used, two types of UHSS (S700 and S960) were used for the steel base, and ultra-high modulus CFRP laminates were used for the composites, with values of 450 GPa for the modulus of elasticity and 1500 MPa for the tensile strength, according to the manufacturer's data.

The specimens were made in different configurations: control specimens without welds, welded specimens without CFRP, and specimens welded and reinforced with CFRP plates applied to both sides of the welded area, using epoxy adhesive.

Figure 3 schematically shows the specimens used in the testing program. The tests were performed under fatigue tensile loading, applying a stress range of 594 MPa, and a Digital Image Correlation (DIC) system was used to measure the strain distribution.

In addition to the experimental tests, the paper includes a detailed finite element (FE) numerical simulation to analyze the stress state in the weld area and the steel/CFRP adhesive bond. The results confirm that the application of CFRP reinforcement keeps the heat-affected zone (HAZ) within the elastic range even at maximum loads, suggesting a significant potential for increasing fatigue life.

The tensile test results show an improvement of up to 32% in ultimate tensile strength and an increase in stiffness of up to 55% for the reinforced specimens, compared to control specimens without welds. Furthermore, the microhardness analysis highlighted a significant reduction in hardness in the HAZ for S960 steel, in contrast to S700 steel, where the effect of welding was minimal. In addition, alternative methods such as High-Frequency Mechanical Impact (HFMI) and TIG-dressing (Tungsten Inert Gas), tested comparatively, did not offer significant improvements in static capacity, but only a limited influence on surface hardness.

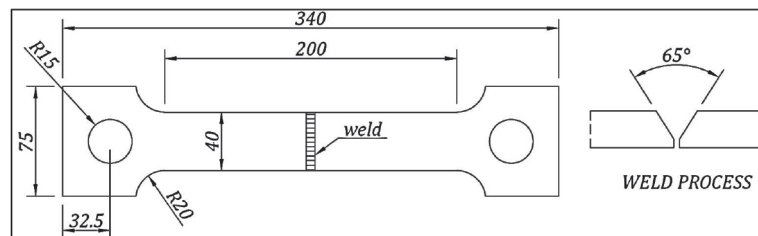
The conclusions of the paper highlight that the application of CFRP reinforcement in the case of UHSS steel welds is an effective method for restoring or even improving load-bearing capacity, being superior to traditional post-processing methods, especially

pentru aplicațiile unde rezistența la întindere și durata de viață la oboseală au o importanță majoră.

Într-o lucrare mai recentă realizată de Ding et al. [18] este abordat un subiect explorat, mai puțin în literatura de specialitate: comportamentul la întindere al plăcilor de oțel sudate cu cordoane de sudură înclinată, consolidate cu laminate CFRP, în prezența tensiunilor reziduale (welding residual stress, WRS), rezultate în urma procesului de sudare. Studiul este motivat de faptul că sudurile înclinăte sunt frecvent întâlnite în practica inginerescă. Tensiunile reziduale joacă un rol esențial în inițierea fisurilor și în comportamentul la oboseală al acestor componente.

În această lucrare autorii au investigat comportamentul acestui tip de componente printr-o campanie de teste experimentale dar și prin intermediul modelării numerice, cu ajutorul metodei elementului finit.

Testele experimentale s-au efectuat pe epruvete confecționate din oțel Q355, specific standardelor chinezești, care au forma și dimensiunile prezentate în figura 4. Principalele caracteristici mecanice ale oțelului Q355 sunt exprimate prin valorile modului de elasticitate  $E=206$  GPa, respectiv rezistența la curgere  $f_y=383$  MPa. Un aspect important care trebuie menționat este faptul că testele experimentale s-au efectuat pe epruvete din oțel sudate cap la cap fără aplicarea soluției de consolidare cu materiale compozite.



**Figure 4.** Prezentare schematică a epruvetelor (dimensiuni în mm), adaptat după [18]

**Figure 4.** Schematic view of the specimens (dimensions in mm), adapted from [18]

Principalul scop al programului experimental, a constat în măsurarea, tensiunilor remanente, rezultate din procesul de sudare. Pentru aceasta s-a utilizat un dispozitiv de măsurare a difracției razelor X (X-ray diffraction device, XRD). În urma efectuării testelor s-au obținut următoarele valori pentru tensiunile reziduale maxime la întindere și compresiune, și anume  $0.39 \cdot f_y$ , respectiv  $0.14 \cdot f_y$ , raportat la rezistența la curgere a oțelului.

A doua parte a investigațiilor a presupus dezvoltarea unui model numeric, tridimensional, analizat cu ajutorul metodei elementului finit. Acest model simulează procesul de sudare, propagarea căldurii și dezvoltarea tensiunilor reziduale, efectul unghiului de înclinare al sudurii (cu valori cuprinse între

for applications where tensile strength and fatigue life are of major importance.

In a more recent work by Ding et al. [18], a subject less explored in the literature is addressed: the tensile behaviour of steel plates welded with inclined weld beads, strengthened with CFRP laminates, in the presence of welding residual stress (WRS) resulting from the welding process.

The study is motivated by the fact that inclined welds are frequently encountered in engineering practice. Residual stresses play an essential role in crack initiation and the fatigue behaviour of these components. In this work, the authors investigated the behaviour of this type of component through a campaign of experimental tests and also through numerical modeling using the finite element method.

The experimental tests were carried out on specimens made of Q355 steel, specific to Chinese standards, which have the shape and dimensions shown in figure 4.

The main mechanical characteristics of Q355 steel are expressed by the values of the modulus of elasticity  $E = 206$  GPa and the yield strength  $f_y = 383$  MPa. An important aspect, regarding the experimental program, is that the experimental tests were performed on butt-welded steel specimens without the application of the composite material reinforcement solution.

The main goal of the experimental program was to measure the residual stresses resulting from the welding process. For this purpose, an X-ray diffraction (XRD) device was used. Following the tests, the maximum tensile and compressive residual stresses were found to be  $0.39 \cdot f_y$  and  $0.14 \cdot f_y$ , respectively, relative to the yield strength of the steel.

The second part of the investigation involved developing a three-dimensional numerical model analyzed using the finite element method. This model simulates the welding process, heat propagation, and residual stress development, as well as the influence of the weld inclination angle (ranging from  $0^\circ$  to  $60^\circ$ ), and the weld bead's thickness and width.

0°-60°), grosimea și lățimea cordonului de sudură. Totodată este important de precizat că soluția de consolidare cu materiale compozite CFRP a fost studiată exclusiv pe baza modelării numerice.

Rezultatele, analizei numerice arată că mărirea unghiului sudurii reduce semnificativ vârful tensiunii reziduale, de la  $0.32 \cdot f_y$  la  $0.06 \cdot f_y$ , raportat la limita de curgere a oțelului, când unghiul de înclinare al sudurii crește de la 0° la 60°. Pe de altă parte, lățimea și înălțimea sudurii influențează distribuția tensiunilor reziduale într-un mod mai mic. Studiul identifică o distribuție parabolică a tensiunilor reziduale de-a lungul sudurii, cu tensiuni de întindere în zona centrală a cordonului de sudură și compresiune spre capete. Conform autorilor acest comportament poate fi explicat prin mecanismul de răcire diferențială din timpul procesului de sudare.

Pentru analiza comportamentului la întindere, plăcile au fost consolidate cu materiale compozite CFRP, disponibile comercial, aplicate pe ambele fețe, folosind rășină epoxidică și tratament prin vid. Modelele numerice au arătat că aplicarea consolidării cu materiale compozite CFRP reduce tensiunile maxime din zona sudurii, întârzie apariția curgerii în substratul metalic și redistribuie solicitările în direcția materialului de bază. De asemenea, s-a confirmat că zonele capăt ale cordoanelor de sudură ating mai târziu domeniul plastic datorită distribuției inițiale a tensiunilor remanente.

Principalele concluzii ale studiului evidențiază eficiența consolidării cu materiale compozite, CFRP în reducerea solicitărilor în structurile cu suduri înclinate, iar unghiul de înclinare al cordoanelor de sudură are o influență dominantă asupra valorilor tensiunilor reziduale.

O abordare diferită față de cele prezentate anterior este cea din studiul experimental realizat de Wang Z.-Y. și Wang Q.-Y. [19]. Lucrarea investighează atât experimental, cât și numeric eficiența consolidării cu materiale compozite CFRP a îmbinărilor sudate din grinzi cu plăci de oțel ondulat, în scopul creșterii rezistenței la oboseală. Aceste detalii sudate sunt des întâlnite în cazul rigidizării inimilor grinzilor din structura podurilor metalice și sunt cunoscute ca fiind extrem de vulnerabile la fisurarea la oboseală, în special în zona de tranziție dintre cutele longitudinale și cele înclinate ale plăcii ondulate.

Studiul propune mai multe variante diferite de consolidare cu straturi sau fâșii din compozite CFRP aplicate pe una sau ambele fețe ale plăcii principale, inclusiv o variantă de consolidare cu fâșii aplicate doar pe zona curburii de tranziție. Astfel, o primă serie de epruvete au fost consolidate cu CFRP aplicate în trei straturi, urmate de o altă serie, cu nu-

It is also important to note that the CFRP composite strengthening solution was studied exclusively through numerical modeling.

The numerical analysis results showed that increasing the weld angle significantly reduces the peak residual stress, from  $0.32 \cdot f_y$  to  $0.06 \cdot f_y$ , relative to the yield strength of the steel, when the inclination angle increases from 0° to 60°. On the other hand, the width and height of the weld have a smaller effect on the residual stress distribution. The study identified a parabolic distribution of residual stresses along the weld, with tensile stresses in the central region of the weld bead and compressive stresses towards the ends. According to the authors, this behavior can be explained by the differential cooling mechanism during the welding process.

For the tensile behavior analysis, the plates were strengthened with commercially available CFRP composites, applied on both sides using epoxy resin and vacuum treatment. The numerical models showed that applying CFRP composite strengthening reduces peak stresses in the weld area, delays the onset of yielding in the steel substrate, and redistributes the loads toward the base material. It was also confirmed that the ends of the weld beads enter the plastic domain later due to the initial residual stress distribution.

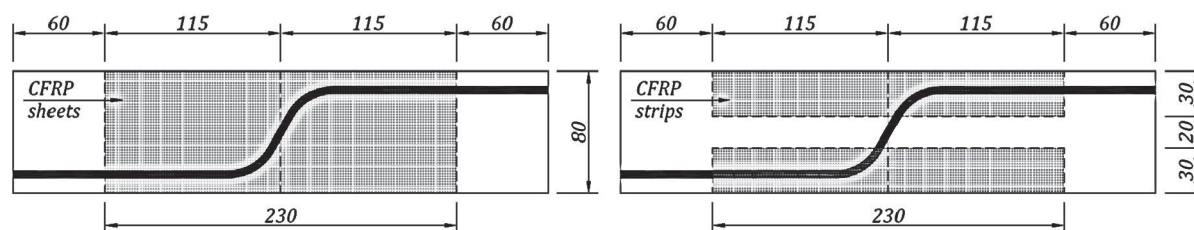
The main conclusions of the study highlight the effectiveness of CFRP composite strengthening in reducing stresses in structures with inclined welds, and that the weld bead inclination angle has a dominant influence on residual stress values.

A different approach compared to those previously presented is found in the experimental study conducted by Wang Z.-Y. and Wang Q.-Y. [19]. The paper investigates both experimentally and numerically the effectiveness of CFRP composite strengthening of welded joints in beams with corrugated steel plates, aimed at improving fatigue resistance. These welded details are commonly encountered in the stiffening of beam webs in steel bridge structures and are known to be extremely vulnerable to fatigue cracking, especially in the transition area between the longitudinal and inclined corrugations of the plate.

The study proposes several different strengthening configurations using CFRP layers or strips applied on one or both sides of the main plate, including a variant with strips applied only in the curvature transition area.

Thus, a first series of specimens was strengthened with CFRP applied in three layers, followed by an-

mai un strat aplicat doar pe o singură parte a plăcii principale, iar epruvetele consolidate cu fâșii CFRP în zona de tranziție a curburii au fost aplicate pe ambele părți ale plăcii principale. Testele au fost efectuate pe epruvete realizate din oțel Q345, specific standardelor chinezești, iar consolidarea s-a făcut cu materiale compozite CFRP și adeziv epoxidic disponibile comercial. În figura 5 sunt prezentate schematic forma și dimensiunile epruvetelor utilizate în programul experimental.



**Figura 5.** Prezentare schematică a epruvetelor (dimensiuni în mm), adaptat după [19]

**Figure 5.** Schematic view of the specimens (dimensions in mm), adapted from [19]

Testele s-au efectuat la oboseală prin intermediul unui dispozitiv servo hidraulic, având o capacitate maximă de 100 kN. Încercările de oboseală s-au desfășurat în regim de sarcină sinusoidală cu amplitudine constantă, cu frecvență de 8 Hz și pentru domenii ale tensiunilor variind între 135 MPa și 200 MPa.

Rezultatele experimentale au arătat o creștere semnificativă a duratei de viață la oboseală pentru toate variantele consolidate. În cazul epruvetelor consolidate cu trei straturi de materiale CFRP s-a observat o creștere medie de aproximativ 91% comparativ cu epruvetele de referință neconsolidate, în timp ce epruvetele consolidate localizat pe curbura de tranziție a dus la o îmbunătățire similară cu variantele consolidate pe întreaga lățime, confirmând astfel importanța consolidării zonelor critice.

Studiul imaginilor obținute cu SEM, a pus în evidență patru faze ale estimării duratei de viață a fisurilor din oboseală: cedarea la interfața oțel/adeziv, inițierea fisurii la muchia cordonului de sudură, penetrarea în grosimea plăcii principale a fisurii, propagarea fisurii pe direcția grosimii perpendicular pe direcția tensiunilor de întindere. Un aspect important care a fost observat este că toate variantele de consolidare au redus sau întârziat apariția acestor faze.

În completare, o analiză numerică cu elemente finite a fost utilizată cu scopul principal de a calcula factorul de intensitate a tensiunii în funcție de parametri precum unghiul de ondulare, numărul de straturi CFRP, modulul de elasticitate al fibrelor și al adezivului. Modelele numerice au confirmat că o consolidare eficientă reduce semnificativ factorul de intensitate

other series with only one layer applied on one side of the main plate. The specimens with CFRP strips applied in the transition curvature area were reinforced on both sides of the main plate. The tests were carried out on specimens made of Q345 steel, specific to Chinese standards, and the strengthening was done using commercially available CFRP composite materials and epoxy adhesive. Figure 5 schematically presents the shape and dimensions of the specimens used in the experimental program.

The tests were performed under fatigue loading using a servo-hydraulic device with a maximum capacity of 100 kN. The fatigue tests were carried out under constant amplitude sinusoidal loading, with a frequency of 8 Hz and for stress ranges varying between 135 MPa and 200 MPa.

The experimental results showed a significant increase in fatigue life for all reinforced variants. In the case of specimens reinforced with three layers of CFRP materials, an average increase of approximately 91% was observed compared to the unreinforced reference specimens, while specimens locally reinforced at the transition curvature showed a similar improvement to the fully reinforced variants, thus confirming the importance of reinforcing critical areas.

The study of the images obtained with SEM highlighted four phases in the estimation of fatigue crack life: failure at the steel/adhesive interface, crack initiation at the weld bead edge, penetration of the crack into the thickness of the main plate, and crack propagation in the thickness direction perpendicular to the direction of tensile stresses. A particularly important aspect that was observed is that all reinforcement variants reduced or delayed the appearance of these phases.

In addition, a finite element numerical analysis was used with the main purpose of calculating the stress intensity factor as a function of parameters such as the bend angle, the number of CFRP layers, and the elastic modulus of the fibers and the adhesive. The numerical models confirmed that effective reinforcement significantly reduces the stress intensity

a tensiunii, în special pentru unghiuri de ondulare mici și fisuri adânci. De asemenea, creșterea modului elastic al adezivului a avut efecte favorabile în cazul ranforsărilor multistrat.

Concluziile lucrării indică faptul că utilizarea compozitelor CFRP, ca soluție de consolidare reprezintă o metodă eficientă pentru creșterea durabilității îmbinărilor. Consolidarea locală în zona curburii de tranziție poate avea o eficiență similară cu cea în care s-a optat pentru consolidarea completă, însă la un consum de material mai redus.

#### 4. Concluzii

Utilizarea compozitelor polimerice ranforsate cu fibre de carbon (CFRP) pentru reabilitarea și consolidarea structurilor sudate din oțel în vederea reducerii efectelor obosealii a atras o atenție considerabilă în ultimele decenii. Sensibilitatea ridicată a elementelor sudate din oțel la cedarea prin oboseală impune necesitatea explorării și implementării unor tehnici inovatoare de consolidare, iar compozitele polimerice CFRP s-au evidențiat ca o soluție extrem de promițătoare în acest sens.

Rezultatele cercetărilor analizate în acest articol evidențiază în mod constant potențialul compozitelor CFRP de a îmbunătăți semnificativ comportamentul la oboseală și de a prelungi durata de viață a structurilor sudate din oțel, în mod deosebit, prin tehnici de consolidare bazate pe aplicarea externă. Studiile de caz din practică întăresc fezabilitatea și beneficiile utilizării CFRP în aplicații industriale variate. Deși există în continuare provocări și limitări, precum costurile ridicate și absența unor standarde sau norme de proiectare dedicate, eforturile continue de cercetare și dezvoltare contribuie activ la depășirea acestor obstacole și pregătesc terenul pentru o adoptare mai largă a acestei tehnologii.

Viitorul reabilitării structurilor metalice va fi, fără îndoială, marcat de un rol din ce în ce mai important al materialelor compozite avansate, precum polimerii ranforșați cu fibre de carbon (CFRP). Proprietățile mecanice superioare ale acestora, combinate cu versatilitatea (adaptabilitatea) în aplicare, le transformă într-un instrument indispensabil pentru inginerii care urmăresc creșterea durabilității, siguranței și a sustenabilității infrastructurii sudate din oțel.

factor, especially for small bend angles and deep cracks. Also, increasing the elastic modulus of the adhesive had visible favourable effects in the case of multilayer reinforcements.

The conclusions of the paper indicate that the use of CFRP composites as a reinforcement solution is an effective method for increasing the durability of joints. Local reinforcement in the transition curvature area can have similar efficiency to that where full reinforcement was chosen, but with lower material consumption.

#### 4. Conclusion

The use of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites for the rehabilitation and strengthening of welded steel structures to reduce fatigue effects has attracted considerable attention over the past decades.

The high sensitivity of welded steel components to fatigue failure underlines the need for exploring and implementing innovative strengthening techniques. In this context, CFRP composites have emerged as a highly promising solution.

The findings of the research reviewed in this article consistently highlight the potential of CFRP composites to significantly improve fatigue performance and extend the service life of welded steel structures, particularly through externally bonded strengthening techniques. Practical case studies reinforce the feasibility and benefits of using CFRP composites in various industrial applications. Although challenges and limitations remain, such as high costs and the lack of dedicated design codes or standards, ongoing research and development efforts are actively helping to overcome these obstacles and pave the way for wider adoption of this technology.

The future of metallic structure rehabilitation and strengthening will undoubtedly be shaped by the increasingly important role of advanced composite materials, such as carbon fiber-reinforced polymers (CFRP). Their superior mechanical properties, combined with adaptability in application, make them an indispensable tool for engineers aiming to increase the durability, safety, and sustainability of welded steel infrastructure.

## Bibliografie / References

- [1] Holloway, L.C., Teng, J.G., 2008. Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites, Woodhead Publishing in Materials-CRC Press, 2008
- [2] Kühn, B., Lukić, M., Nussbaumer, A., Günther, H.P., Helmerich, R., Herion, S., Kolstein, M.H., Walbridge, S., Androic, B., Dijkstra, O., Bucak, Ö, 2008. Assessment of Existing Steel Structures-Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, First Edition, JRC Publications Repository, 2008
- [3] EN 10025- Hot rolled products of structural steels
- [4] SIA 269/3:2011 Existing structures – Steel structures
- [5] Masuelli, M.A., 2013. Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes, from the edited vol. „Fiber Reinforced Polymers- The Technology Applied for Concrete Repair” Edited by Martin Alberto Masuelli, 2013, <http://dx.doi.org/10.5772/54629>
- [6] CNR-DT 200 R1/2013 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures- Materials, RC and PC structures, masonry structures
- [7] CNR-DT 202/2005 Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Metallic Structures
- [8] Maddox, S.J., 1991, Fatigue Strength of Welded Structures, 2nd ed., Woodhead Publishing, 1991
- [9] Fricke, W., 2003. Fatigue analysis of welded joints: state of development, Mar. Struct., vol. 16, nr. 3, pp. 185–200. doi: 10.1016/S0951-8339(02)00075-8
- [10] Radaj, D., Sonsino, C., Fricke, W., 2009. Recent developments in local concepts of fatigue assessment of welded joints, Int. J. Fatigue, vol. 31, nr. 1, pp. 2–11. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2008.05.019
- [11] Fricke, W., 2015. Recent developments and future challenges in fatigue strength assessment of welded joints, Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci., vol. 229, nr. 7, pp. 1224–1239. doi: 10.1177/0954406214550015
- [12] Hobbacher, A.F., Baumgartner, J., 2024, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, Springer Nature, 2024
- [13] Feier A., Petzek E., Băncilă R. Alcătuirea și Calculul Construcțiilor Metalice Sudate, Editura Sudura 2021, ISBN 958-973-8359-63-5 (p.215-219)
- [14] Zhao, X.L., Zhang, L., 2007. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures, Engineering Structures, 29, p. 1808–1823. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.006>
- [15] Gholami, M., Sam, A.R.M., Yatim, J.M., Tahir, M.M., 2013. A review on steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance, Construction and Building Materials, vol. 47, 2013, pp. 301-310, ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.049>
- [16] Tong L., Yu Q., Zhao X.L., 2020. Experimental study on fatigue behavior of butt-welded thin-walled steel plates strengthened using CFRP sheets, Thin-Walled Structures, vol. 147, 106471, ISSN 0263-8231. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106471>
- [17] Amraei, M., Jiao, H., Toghyani, A., Björk, T., Zhao, X.-L., 2021. CFRP strengthening of butt-welded ultra-high strength steels under quasi-static tensile loading, Engineering Structures, 246. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113052>
- [18] Ding, X., Liang, X., Chen, M.-T., Hu, L., 2024. Study on CFRP-Strengthened Welded Steel Plates with Inclined Welds Considering Welding Residual Stress, Materials, 17, 1804. <https://doi.org/10.3390/ma17081804>
- [19] Wang, Z.-Y., Wang, Q.-Y., 2015. Fatigue strength of CFRP strengthened welded joints with corrugated steel plates, Composites Part B: Engineering, vol. 72, pp. 30-39, ISSN 1359-8368. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.021>

### Pentru citare:

Bratu, C., Radu, D., Băncilă, R., (2025). Correlations regarding the evolution of the welded structural steels microstructure in relation to welding conditions, Sudura, nr. 2, year XXXV, 13-27, <https://doi.org/10.70652/sud.2025.2.2>



# NEWSLETTER

Buletin informativ editat de Asociația de Sudură din România



Nu uitați!

Informații noi despre activitățile ASR sunt prezentate lunar în **ASR Newsletter**, accesibil pe **www.asr.ro**