



WELDED REINFORCEMENT GRIDS AND THEIR APPLICABILITY IN CZECH ENVIRONMENT

V. Hanuš*, P. Štemberk**

Summary: WRG stands for Welded Reinforcement Grids, which is a technology dealing with welding of steel reinforcement bars. The main idea of WRG is a replacement of the conventional bended transverse reinforcement with welded transverse reinforcement in order to get more effective functioning of the structure. The differences lead to a partial change in presumptions of Baugrid and Bautech firms that deal with design of welded grids. The relations describing stresses and behavior of welded materials are often based on experiments. For this reason, the most up-to-date standard provisions recommend and require a series of normative tests for all sorts of structural welded reinforcement joints. The computational methods are put aside and more likely used as a preliminary or conservative solution in order to find the values of stresses and capacity. This fact can lead to less effective and uneconomical design of welded reinforcement with a greater margin of reliability and safety. It is also recommended to verify the final values by normative tests and correct the design by the obtained values...

1. Úvod

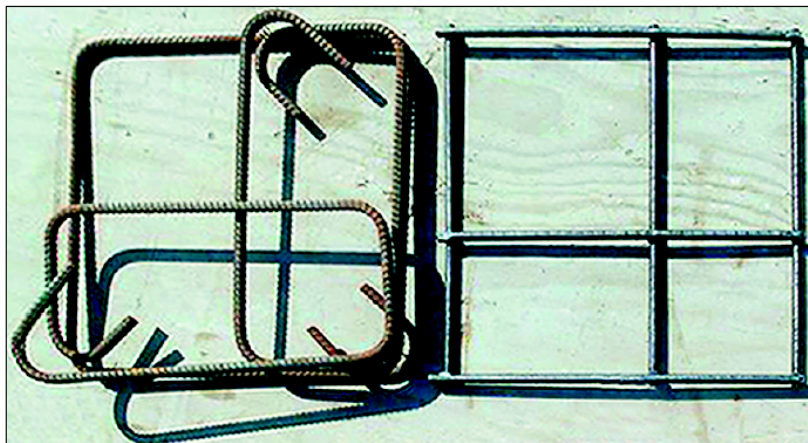
V současné době se Česká republika řadí k zemím střední Evropy s nejkratší dobou zhotovení stavebních konstrukcí. Tato skutečnost se často projevuje spíše negativním dopadem na výsledné provedení stavebního díla. Zkrácení času výstavby je většinou dosaženo nedodržením technologických přestávek a postupů jednotlivých stavebních činností. Krátká doba na zhotovení zakázky je často požadavkem investora, a tak stavební podniky často přeceňují své schopnosti a dopouštějí se technologických přestupků ve snaze splnit zadaný termín dokončení stavby. V takovou chvíli je vhodným východiskem inovativní technologie, která zkracuje čas výstavby, řeší dosavadní nedostatky a zároveň vykazuje i částečnou úsporu materiálu, stavebního pracovníka a ve výsledku i investičních nákladů.

WRG se zabývá svařováním betonářských ocelí a vytváří tak adekvátní náhradu za běžně používanou smykovou výztuž. Tato technologie, v celém znění Welded Reinforcement Grids, s sebou přináší mnoho popisovaných kladů bez větší známky negativních vlastností. S průběhem mé analýzy se objevovaly i zápory, které byly spojeny s nesouladem předpokladů amerických norem při aplikaci v evropských standardech. Mimo to i další faktory poukazují na spory se zveřejněnými podklady kalifornských firem Baugrid a Bautech, které technologii WRG jako první uvedly do provozu a do dnešní doby ji úspěšně používají.

* Ing. Vít Hanuš, ** doc. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.: Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze; Thákurova 7; 166 29 Praha 6; tel.: +420.224 354 364, fax: +420.233 335 797; e-mail: vit.hanus@fsv.cvut.cz

2. Popis technologie WRG

Welded reinforcement grids je nová nekonvenční technologie příčného vyztužování. Samotné vázání výztuže je spojeno s velkou stavební pracností a jedná se o časově náročný proces. Technologie svařovaných smykových třmínků účinně snižuje stavební pracnost a její hlavní producenti deklarují i úsporu samotné betonářské výztuže.



Obr.1: Běžný ohýbaný třmínek nalevo, svařovaný třmínek WRG napravo

V praxi technologie WRG znamená, že běžná ohýbaná obvodová matrice s ohýbanými středními profily je nahrazena jedním uceleným svařovaným profilem (Obr.1). U technologie WRG jsou pruty precizně svařeny ve tvaru libovolného smykového třmínku. Spojení jednotlivých prutů je vytvořeno nosnými křížovými svary.

Technologie WRG pochází z Jižní Kalifornie od konstruktéra Ing. Hannse U. Baumanna S.E.. Na základě dlouholetých výzkumů vznikl z komerčních a marketingových důvodů Baumannův podnik s názvem „Baumann international“, který byl v roce 1999 přejmenován na firmu „BauTech,Inc.“. Firma BauTech je v současné době celosvětově jediným producentem třmínků WRG s výrobním označením „BauGrid“. První realizace stavby s použitím této technologie se datuje do roku 1987.

3. Výhody technologie WRG

V roce 1992 obdržel Hanns Baumann pro technologii WRG ocenění „The Nova Award“ za nejlepší současnou inovaci v oblasti stavebního průmyslu. Jedním z důvodů pro udělení tohoto ocenění byly výhody systému WRG, které firma Baugrid dodnes deklaruje. Mezi ně patří především:

- Přesnější výroba samotného smykového třmínku a zmenšení výrobních tolerancí
- Snížení stavební pracnosti spojené s vázáním třmínků a urychlení výstavby
- Zlepšení přepravních rozměrů a skládkování stavebních materiálů
- Přesnější osazení výztuže
- Zlepšení probetonování ocelové armatury
- Zvýšení tuhosti ocelového svařence a následně celé konstrukce
- Úspora výztuže v místech dřívějších ohybů, zakotvení a překryvů
- Možnost formovat libovolný tvar smykového třmínku

Svařované smykové třmínky mohou najít uplatnění v ohýbaných prvcích a suplovat tak konvenční ohýbané smykové vyztužení. Další oblastí využití jsou tlačené prvky, kde dochází často na mezi únosnosti ke kolapsu vlivem velkých příčných tahů. Stejně tak může WRG nalézt uplatnění v podkotevních oblastech předpínaných konstrukcí jako výztuž zabezpečující přenos velkých tahových napětí.

Velké příčné tahy často vedou k návrhu velkého množství příčných profilů. Při skládání jednotlivých dílů víceřizných třmínků nabývá objem samotné výztuže, což často komplikuje ukládání betonové směsi. V nejvíce exponovaných průřezích tak může svařovaný třmínek snížit objem použité výztuže a zkvalitnit tak realizaci (*viz příklad Obr.1*).

4. Problematika svařování betonářské oceli

Podstatou celé technologie WRG je účinné svařování profilů betonářské oceli do jednoho uceleného segmentu, který bezpečně nahradí běžně používané skládané ohýbané třmínky (*Obr.1*). U svařovaných prvků dochází ke spojení díky malé plošce svaru. Vznikající vnitřní síly jsou stejné, ale roznos těchto sil na malé plošce svaru přináší vysoké hodnoty napětí, kterým musí svar aktivně odolávat po celou dobu životnosti konstrukce. Hlavním problémem WRG je tedy zajištění únosnosti svarového spoje.

Svarové spoje se často vyznačují křehkolomovými vlastnostmi, sníženou houževnatostí a přetvárností. To může být zásadním faktem ve chvíli, kdy požadujeme určitou míru deformací a velikosti trhlin z důvodů předčasného varování před kolapsem.

5. Svařování

Zdroj tepla při svařování vyvolává v oblasti svarového spoje místní nerovnoměrný ohřev od teploty tavné směsi. Dochází tak k podstatným změnám ve struktuře materiálu. Mění se fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti materiálu. Za takových podmínek za úspěšný a dostačující výsledek považují svarový spoj požadovaných vlastností a jakosti. K tomu je nezbytně nutné provést co nejpřesnější analýzu působících vlivů a eliminovat možné zdroje vad.

6. Pochody při svařování

Zdroj tepla při svařování vyvolává v oblasti svarového spoje místní nerovnoměrný ohřev od teploty tavné směsi. Jsou to:

- Protichůdná elektroosmóza (precipitace) nebo segregace fází přesyceného tuhého roztoku v základním materiálu.
- Srážení, při němž se z roztoku vylučuje pevná látka (koagulace) precipitátů nebo jemně rozptýlené látky v jiné látce (disperze) s následnou změnou mechanických vlastností.
- Vytváření atmosfér na dislokacích při svařování ocelí s vyšším obsahem vmezeřených (intersticiálních) prvků rozpuštěných v mřížce. Tato okolnost se projevuje v tepelně ovlivněné oblasti růstem meze kluzu a poklesem vrubové houževnatosti, vznikem křehkého pásma podél svarového spoje (stárnutím).
- Rekrystalizace v tepelně ovlivněné oblasti deformačně zpevněného základního materiálu.

- Částečné polymorfní přeměny vlivem teplot tvořící strukturu neobvyklého charakteru, lišící se od původního základního materiálu mechanickými a technologickými vlastnostmi.
- Hrubnutí zrna při překročení určité prahové teploty, tj. přehřátí svarového kovu v pásmu závaru a přilehlé oblasti základního materiálu (TOO).

S klesající teplotou se uvolňují dále ze svarové lázně plyny i struska, z části dle rychlosti odvodu tepla vystupují na povrch lázně. Z části zůstanou v lázni jako bubliny, póry a struskové vměsky. Přitom dochází v tepelně ovlivněných oblastech k procesům, které souvisejí s velikostí zrna. Zrno je soustava krystalů kovu v polykrystalickém materiálu s nedokonalým geometrickým uspořádáním, které souvisí s omezenými možnostmi růstu zrna při krystalizaci. Z hlediska svařování je určující sekundární rekrytalizace, což je tepelně aktivovaný děj, při němž zrna stejné fáze v rekrytalizované oblasti rostou nad původní velikost zrna před jeho deformací. Krystalické zhrubnutí nastává při deformaci 2 až 10 % průměru profilu za teploty 1100 °C a vyšší, kdy je nebezpečí vzniku silně hrubozrnné oblasti.

7. Makrostruktura a mikrostruktura svarového přípoje

Ocel prochází při tepelných a chemických úpravách strukturními změnami. Ve většině případů se jedná o nežádoucí jev, při kterém rekrytalizuje ocel na hrubozrnnější fázi. Tyto změny jsou provázeny zvýšením pevnosti, tvrdosti, ale i lámavosti a křehkosti. Mimoto dochází k nežádoucímu snížení tažnosti, pružnosti, houževnatosti a potenciálu svařitelnosti. Jednotlivé mikrostruktury si můžete prohlédnout na mikroskopických a rentgenových snímcích (Obr.6-11).



Obr.2: Povrch oceli tvořený bainitem



Obr.3: Žebírko tvořené dolním bainitem



Obr.4: Svar v oblasti žebírka



Obr.5: Vyžíhaná TOO



Obr.6: Perlit na hranici ztavení



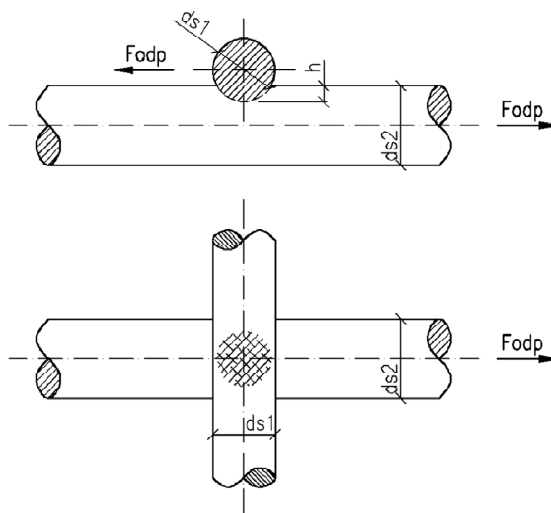
Obr.7: Martenzit v TOO

Při použití kombinace menších profilů dojde k při stejné hloubce závaru ke spojení až na hranici jádra průřezu, tedy perlitické struktury (Obr.6). Při použití příliš malých profilů by

došlo k celkovému vyžehání průřezu a následně ke znehodnocení struktury oceli. Při použití příliš velkých profilů nedojde ke ztavení na hranici jádra průřezu, ale pouze v povrchových bainitických vrstvách, což může vést ke křehkolomovým vlastnostem spoje. Americký distributor svařovaných trmíků WRG, firma Baugrid, používá při výrobě převážně nosné křížové svary spojů výhradně technologií odporového svařování.

8. Odporové svařování

Teplo vzniká přímo ve svařovaných materiálech a není přiváděno zvenčí jako u jiných technologií, např. el. oblouk. Důležitým parametrem vedle elektrického proudu je tlak. Skicu odporového křížového svaru betonářské výztuže si můžete prohlédnout na obrázku (Obr.8). Finální spojení se provádí větším nebo menším tlakem ve chvíli největšího ohřevu. Vytvořená svarová čočka má charakter litého kovu, s výrazně dendritickou strukturou. Díky žebírkům na použité oceli lze odporové sváření výztuže považovat za svařování výstupkové na lisu.

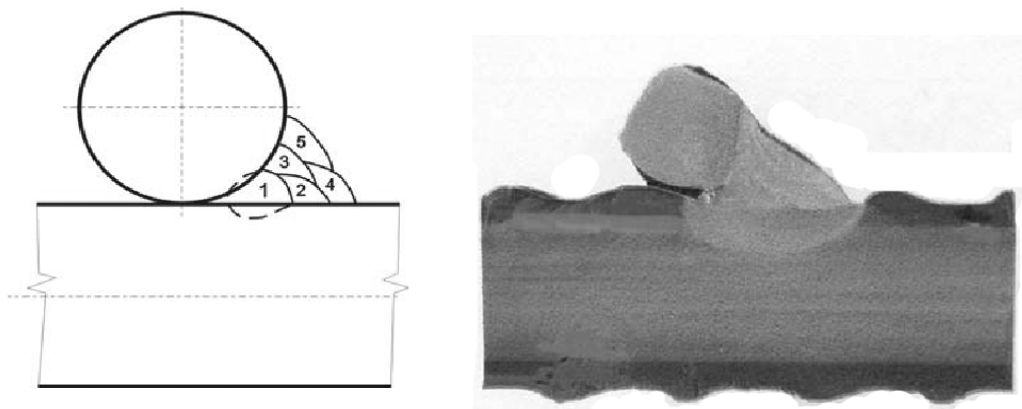


Obr.8: Schéma bodového odporového křížového

Z hlediska zatížení je u bodového svaru výhodnější volit konstrukci tak, aby převládalo smykové namáhání (Obr.8). Při svařování elektrickým obloukem dochází pod roztavenou struskou k ovlivnění chemického složení svarového kovu. Tavidlo deleguje ocel a míru delegace je obtížné stanovit. Kombinace přídatného svarového materiálu musí být voleny tak, aby se dosáhlo optimálního složení svarového kovu, které se blíží co nejvíce k chemickému složení základního materiálu. Pokud by materiál svarového spoje měl při cyklickém zatěžování podstatně větší plasticitu než základní materiál, koncentrovala by se v jeho objemu cyklická proměnná plastická deformace a docházelo by k poklesu odolnosti svarového spoje. TOO má mít stejné plastické vlastnosti jako základní materiál. Je nutné zabránit přílišnému zvýšení tvrdosti v TOO svarového spoje. Při svařování běžných konstrukčních ocelí nemá tvrdost překročit hodnotu 350 HV, u jemnozrnných ocelí vyšší pevnosti jsou přípustné hodnoty tvrdosti vyšší. Příliš rozdílné vlastnosti základního materiálu a svarového kovu mají nepříznivý vliv na únosnost svařovaného prvku. Vyšší pevnost svarového kovu by měla za následek snížení jeho deformační schopnosti a tím jeho menší odolnost proti únavovému i křehkému porušení.

9. Obloukové svařování

Technologie koutových svarů při větší velikosti navržených spojů spotřebovává neúměrné množství materiálu. Cca 2x větší svar přináší přibližně 4x větší množství navařeného kovu a tím i 4x větší množství přivedeného tepla do svaru. Důležité je i navrhovat optimální velikosti samotných betonářských vložek. Specifickou skupinou svarů jsou vícevrstvé svary (*Obr.9*), kde je nezbytné zajistit potřebnou výšku svarové housenky pro dosažení dostatečné únosnosti.



Obr.9: Vícevrstvý křížový obloukový koutový svar – kladení vrstev, struktura spoje

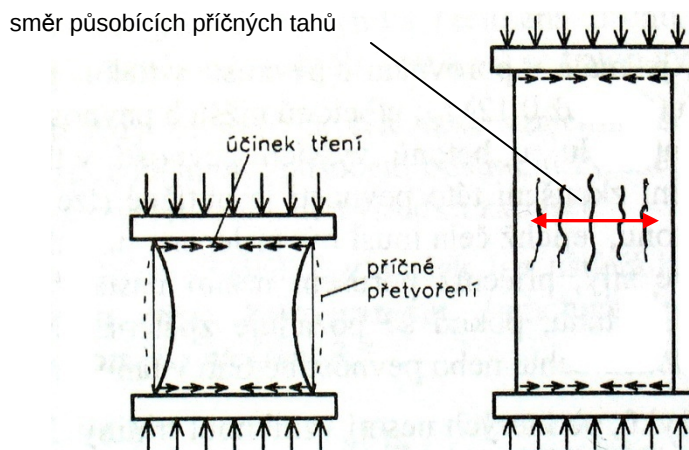
10. Zatížení přípoje – rekrytalizace a reziduální pnutí

Při fázových přeměnách při přechodu hraničních teplot dochází ke změnám objemu. Při růstu krystalu martenzitu vznikají vysoké hladiny vnitřních pnutí, které mohou vyčerpávat únosnost a deformační kapacity spoje. To může mít i zásadní vliv na celou tuhost svařovaného prvku. Příмым důsledkem tuhostí je vznik tlakových vnitřních pnutí při ohřevu a tahových vnitřních pnutí při ochlazování svarového spoje.

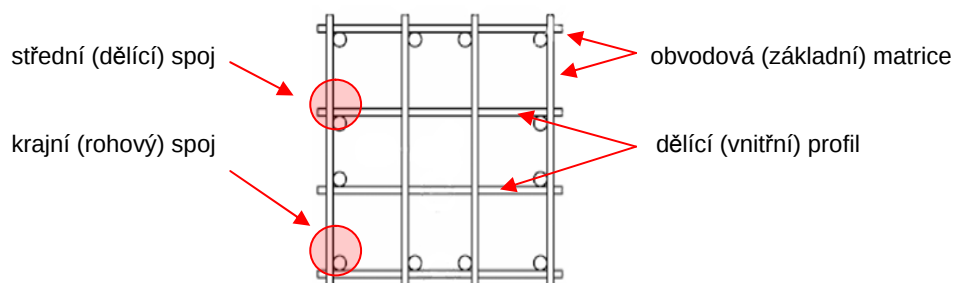
Podstatné jsou pro nás hodnoty konečných zbytkových pnutí a deformací, které zůstávají ve svařenci po vychladnutí. Z hlediska stálosti je důležité udržovat hodnoty zbytkových pnutí pod hodnotou meze kluzu, tedy v pružném stavu. Při překročení této hranice jsou v materiálu vyvolány trvalé plastické deformace. Pro většinu svařovaných přípojí je typická pružno-plastická deformace. Samozřejmě závisí i na velikosti ovlivněné oblasti, která může být na úrovni části či celého přípoje, stejně tak na úrovni několika zrn struktury nebo pouze v oblasti krystalové mřížky. S ohledem na velikost svařovaných profilů je zřejmé, že při vícenásobném prohřívání svařováním dojde ke znehodnocení betonářských profilů. Důraz na tyto vlivy klade i technická norma ČSN EN ISO 17660-1, která z praktických důvodů nepopisuje využití koutového svaru kolem celého styku při volbě obloukového svařování.

11. Zatížení přípoje - silová zatížení

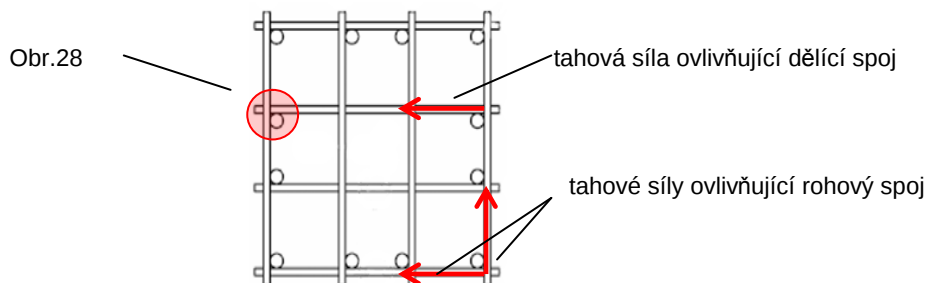
Svařované třmínky jsou primárně navrhovány, aby vzdorovaly silám, které jsou vyvolány od vnějšího zatížení. Při použití smykového třmínku jako vyztužení sloupů, který přenáší příčné tahy (*Obr.10*), jsem každý třmínek sestavoval ze dvou elementů (*Obr.11*).



Obr.10: Přetvoření a porušení tlačných železobetonových prvků

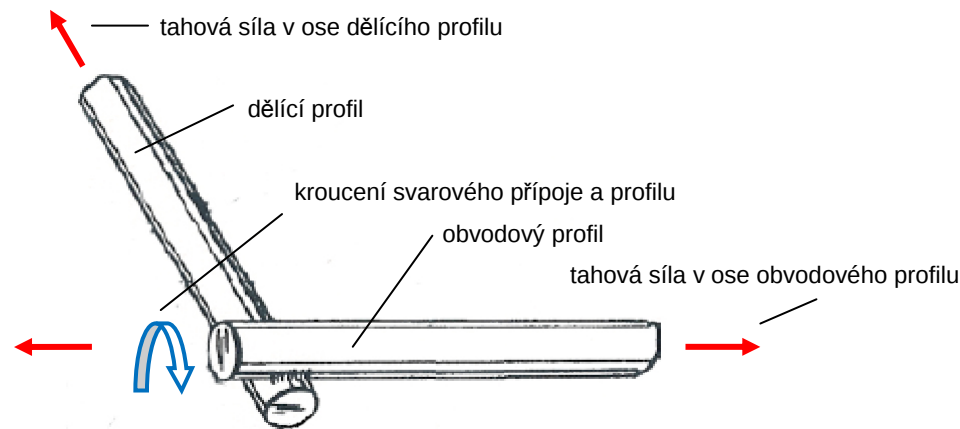


Obr.11: Svařovaný smykový trmínek s využitím technologie WRG



Obr.12: Zatěžovací síly působící na svařové spoje

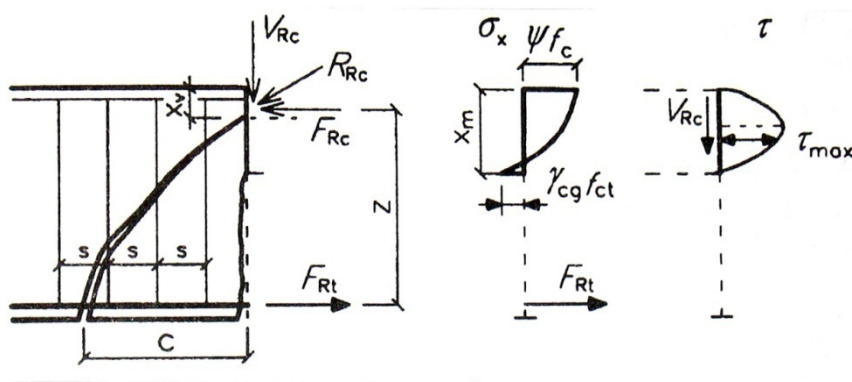
Poloha a typ spoje často rozhoduje o celkové únosnosti. Zatímco střední dělicí profil je při působení příčných tahů zatížen tahovou silou v ose vedení dělicího profilu, krajní spoj je namáhán ve dvou směrech, a to ve směrech vedení obou ze stykovaných profilů (Obr.12). To znamená, že navrhovaný spoj je namáhán ve dvou směrech, což přináší snížení únosnosti vlivem kroucení profilů ve dvou směrech. Při namáhání se projevuje tvarové uspořádání trmínku. Jednotlivé osy profilů leží ve dvou rovnoběžných rovinách. To při zatěžování osovými silami přináší nejen vznik normálových napětí, ale především napětí smykových. Vliv vznikajícího ohybového momentu na spoj se zde v nemalé míře také projeví (Obr.13). U rohového spoje se tento efekt objeví v mnohem větší míře. Při dvouosém namáhání předpokládám snížení únosnosti minimálně na polovinu nebo dokonce na třetinu.



Obr.13: Schéma zatížení dělicího spoje svarového spoje

Tento model reprezentuje stav na mezi únosnosti, kde již neuvažují spolupůsobení betonářské výztuže s betonem. Protahání výztuže je v tuto dobu větší, než je deformační kapacita betonu. Jedná se tedy o stav významného potrhání betonové směsi a opadání krycí vrstvy výztuže. Ve zbylých místech, kde může docházet ke spolupůsobení výztuže s betonem, dochází k příznivému jevu. Obetonované styky mají mnohem vyšší tuhost a únosnost. Je tak zabráněno kroucení svarů atd. Tento pozitivní stav není v žádném místě uvažován, protože ho nelze vždy zajistit. Svým působením tak může přispět k potenciálnímu zvýšení únosnosti, což má v praxi příznivý dopad.

Smykové vyztužení ohýbaných prvků podléhá jiné napjatosti. Je to způsobeno charakterem zatížení a vlivem trhlin (Obr.14). Tato výztuž pomáhá přenášet posouvající síly. Toto zatížení u průvlaků a nosníků (prvky, na které je technologie přizpůsobena) probíhá pouze ve svislém směru. To znamená, že ve vodorovném směru nepředpokládáme při dosažení meze únosnosti primární zatěžování tahovými silami v oblasti kluzu či pevnosti betonářské oceli. Jedná se o pozitivní faktor, neboť se zde nevyskytuje vliv dvouosého zatěžování svarového spoje.

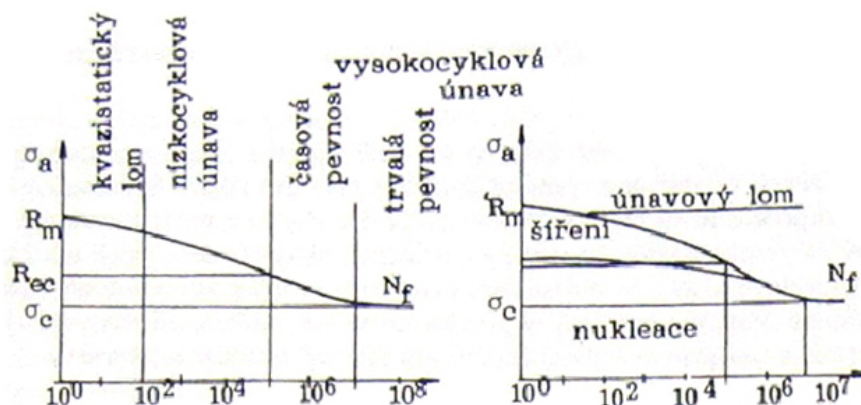


Obr.14: Rozdělení normálových a smykových napětí ve svislém řezu ohýbaného prvku na konci smykové trhliny

12. Cyklické zatěžování

Při cyklickém (vysokocyklickém) zatížení vede únava ke vzniku systému fyzikálně malých trhlin, řádu setin milimetrů. Jedná se o proces spojování strukturně malých trhlin při interakci s defekty struktury, dutinami a inkluzemi. Malé trhliny se postupně rozvíjejí dovnitř tělesa.

Při přechodu přes povrchovou vrstvu materiálu (řád maximálně několika milimetrů) vniknou trhliny do hloubky tělesa. Poté se začnou rozšiřovat jako magistrální mikrotrhliny až do kritické velikosti, kde vzniká rychlý závěrečný lom tělesa. Všechny typy nukleace trhlín jsou spojeny s koncentrací plastických deformací. Obě stádia se prolínají, nelze je ostře ohraničit. K jejich analytickému popisu využíváme jeden společný vztah, který nazýváme rovnicí životnosti a v grafickém tvaru křivkou životnosti (Obr.15).



Obr.15: Ukázka a popis průběhu skutečného chování v oblasti vysokocyklové únavy

Při namáhání statickým zatížením, ať silového nebo deformačního původu, se konstrukce za dobu své životnosti nestačí poškodit únavovým lomem. Nelze však vyloučit poškození konstrukce, převážně namáhané monotónním zatížením, dalšími mechanismy, jako jsou křehký lom nebo koroze pod napětím. Staticky namáhaná konstrukce se nejspíše poškodí dosažením mezního stavu plastické únosnosti. Výpočetní aplikace WRG uzpůsobuje výpočet cyklicky namáhaných spojů, ale i výpočet svarů staticky namáhaných konstrukcí.

Proměnná složka zatížení způsobuje únavu materiálu. Během tohoto procesu se nejprve mění mechanické vlastnosti materiálu, vedoucí k oslabení hranic zrn a k vytvoření mikrotrhlín. Ty postupně každým cyklem rostou až do vytvoření tak velké trhliny, že zbývající průřez není schopen přenést zatížení a nastane lom. Tento proces může být zakončen i křehkým lomem. U konstrukce rozlišujeme dva způsoby mezního porušení.

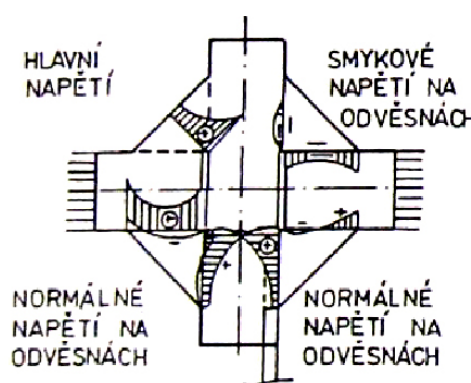
Odolnost oceli vůči opakovanému namáhání se zjišťuje při zkouškách na únavu. Zkušební prvek se při těchto zkouškách podrobuje cyklicky proměnnému zatěžování na pulsátoru a zjišťuje se počet cyklů N , potřebný k porušení prvku. Výsledkem celé řady zkoušek je tzv. Wöhlerova křivka (S-N křivka). Lze vymezit tzv. časovou pevnost, jež odpovídá předem danému počtu cyklů zatížení. Svar tvoří v konstrukci přirozený vrub. Lze tedy očekávat, že prvek s vrubem bude mít mez únavy mnohem nižší než ohýbaná výztuž bez svarových narušení a vrubů.

13. Zatížení provozní teplotou

Vliv změny teploty materiálu může vyvolat porušení konstrukce křehkým lomem, a to při poklesu pracovní teploty pod tranzitní teplotu křehkosti materiálu. Při tom se nepříznivě projevuje tahová zbytková napětí v oblasti svarových spojů, která představují akumulovanou energii v materiálu prvku. Ta je schopna až do svého vyčerpání podporovat nestabilní šíření lomu. Posouzení odolnosti konstrukce vůči křehkému lomu vychází v zásadě ze tří faktorů,

kteřé tuto odolnost charakterizují: je to napětí, velikost trhliny a lomová houževnatost při určité teplotě, tloušťka materiálu a rychlost zatěžování.

Svařované prvky je nutné posoudit i z hlediska křehkého porušení. To se provádí buď přístupem přechodové (tranzitní) teploty nebo přístupem lomové mechaniky. Přístup podle přechodové teploty vyžaduje, aby se konstrukce vyrobila z takového materiálu, jehož přechodová teplota z houževnatého do křehkého porušení leží níže, než je nejnižší pracovní teplota konstrukce. Tento přístup je jednodušší, nevyžaduje přesnou analýzu napětí ani důslednou defektoskopickou kontrolu. Přístup lomové mechaniky vyžaduje i přesný výpočet napětí a úplnou nedestruktivní kontrolu, která musí zjistit nepřijatelné vady. Při pohledu na obrázek (Obr.16) a znalosti geometrie spoje WRG je zřejmé, že svarové spoje jsou ve stavu složité napjatosti. Přesná definice a průběh svarových pnutí se nedají dobře definovat a vynaložené úsilí by jen okrajově odpovídalo skutečnému průběhu napětí v konkrétním svaru prvku WRG.



Obr.16: Napětí v křížovém svaru

Pokud vznik lomu připustíme, je naší snahou zabránit dalšímu šíření a lom zastavit. V takovou chvíli je možné zvolit metodu tranzitních teplot nebo přístup lomové mechaniky. Podle této teorie může být konstrukce provozována při jistém zatížení za teploty, která je vyšší než tranzitní teplota s jistou rezervou. Mezi nejstarší kritéria pro volbu materiálu patří velikosti vrubové houževnatosti, určené na vzorku Charpy-V. Toto kritérium mohu prohlásit za platné po provedení dostatečného počtu lomů za provozních podmínek. Z tohoto hlediska poskytuje často používané kritérium $KCV = 35 \text{ J.cm}^{-2}$ (nebo 59 J.cm^{-2}) při nejnižší provozní teplotě pro běžné konstrukce dostatečnou bezpečnost. Nedává však úplnou záruku zastavení rostoucí trhliny, a proto je nedostatečné pro více namáhané konstrukce.

Při nízké houževnatosti materiálu dojde ke křehkému lomu, který je doprovázen relativně malou plastickou deformací a postačuje k němu relativně malé množství energie. Pravděpodobnost vzniku křehkého lomu v konstrukci roste s klesající teplotou a rostoucí rychlostí jejího zatěžování. Ke vzniku křehkého lomu přispívá i vliv korozního prostředí. V této souvislosti je třeba upozornit na nebezpečí i malých defektů v nežíhaných svarových spojích, kde zbytkové napětí dosahuje hodnot až na mezi kluzu. K iniciaci lomu pak může dojít při provozní teplotě pod stanovenou tranzitní mezí bez ohledu na velikost vnějšího zatížení.

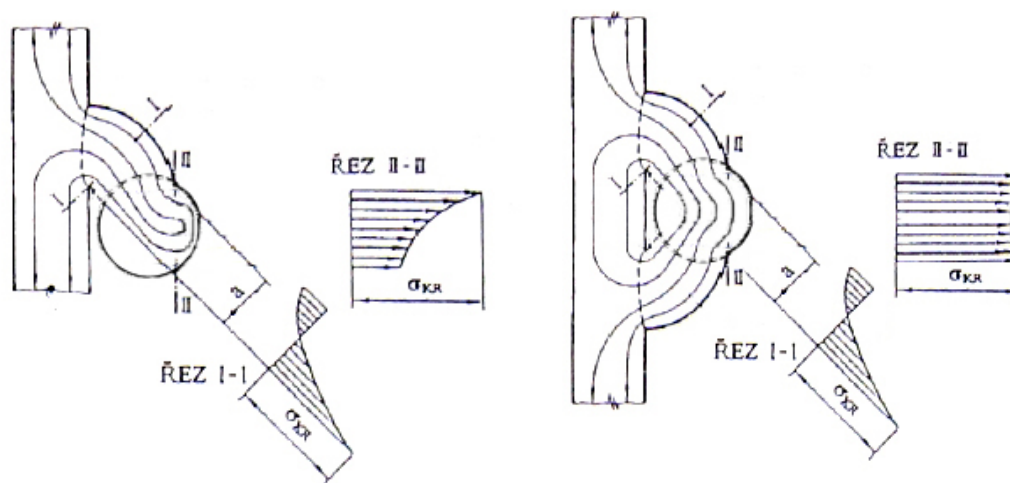
Ve snaze posunout tranzitní hodnoty k co nejnižší hranici opět může pomoci znalost chemického složení materiálu. Pro uhlíkové oceli tranzitní teplota klesá s obsahem uhlíku obsaženým ve struktuře betonářské oceli. Mangan naopak posouvá výrazně tranzitní teploty k nižším hodnotám, poměr Mn/C je proto optimálně volit 5:1 až 6:1. Nikl rovněž posouvá tranzitní oblast k nižším teplotám.

14. Vliv vrubu

Betonářský profil jako takový představuje oblast velkých diskontinuit tvaru a svarový kov společně s TOO představuje oblast malých diskontinuit tvaru. Pro samotný betonářský profil bylo mnohokrát ověřeno, že pokud rozkmit nominálních napětí určených z hodnot primárního a sekundárního zatížení (silového a nesilového) za celou dobu životnosti konstrukce nepřekročí několikanásobně hodnotu časové pevnosti, nebudou plastické deformace v oblasti hrubé diskontinuity tvaru vznikat při dosažení limitních hodnot dovoleného namáhání. I přesto lze v oblastech konstrukce najít části, kde plastické deformace vznikají trvale. Není-li splněna opakovaně rovnováha plastické deformace a dochází-li k opětovnému přetěžování, můžeme prohlásit konstrukci vyhovující, pokud nedosáhneme zatížení na hranici mezního stavu únosnosti. Opakovaný vznik plastických deformací však vede ke zkrácení životnosti, a proto bychom se tomu měli vyvarovat.

Oblast malých diskontinuit tvaru může reprezentovat právě svarový spoj, kde dochází ke koncentraci napětí, tj. k přerozdělení průběhu napětí v řezu oproti průběhu bez přítomnosti vrubu. Obdobně tomu tak je i u částí konstrukce, kde se vyskytuje zbytkové napětí od předěšlého svařování, kde po redistribuci výsledná napětí překročí mez kluzu. Otázkou zůstává, jaký mají vliv napětí ve svaru na výslednou pevnost a životnost konstrukce. Jelikož je výpočet v plastické oblasti materiálu, je chybou si myslet, že platí vztahy pružné analýzy. Byť je ve svaru tlakové reziduální pnutí, nedochází k jeho lineárnímu nárůstu a v okrajových oblastech může být napětí tahové, i přes to může v součtu dojít vlivem tlaku ke zvýšení únavové pevnosti.

Nesymetričnost prvku WRG má za následek odchylku v průběhu silového toku při zatěžování konstrukce. Reprezentativní obrázek (Obr.17) ukazuje změnu silového toku koutových svarů. Technologie WRG využívá oboustranných svarů, a tak hodnota silového toku bude částečně vyrovnána, nicméně zvýšené namáhání v okrajových oblastech bude pořád přetrvávat. To má za následek místní zvýšení napětí a současně snížení meze únavy. V místě napětíových špiček se překročí mez únavy takřka okamžitě a dochází zde ke vzniku mikrotrhlin. Ty představují další vruby a zvyšují vrubový účinek a zeslabují průřez. Dalším zatěžováním se mikrotrhliny zvětšují, vznikají trhliny a po čase dojde k rozlomení svaru. Obrázek (Obr.17) je uveden pouze jako příklad dostupný z odborné literatury a změna zobrazeného silového toku nemusí odpovídat zatěžování u segmentu WRG.



Obr.17: Reprezentativní obrázek změny silového toku v koutových svarech

15. Dovolená namáhání

Při výpočtu namáhání se svar uvažuje jako součást průřezu. Předpokládá se, že je ve svaru stejný průběh namáhání jako v okolním materiálu. Vzhledem k možným vadám a nepravidlostem ve svaru uvažujeme mnohem větší součinitel bezpečnosti, než u základního materiálu. Výpočet velikosti svaru je založen na základě dovolených napětí. Již v prvních fázích výpočtu jsou předepsány jednotlivé maximální přípustné hodnoty napětí, které nemají být po dobu užívání překročeny. Při znalosti číselných hodnot těchto napětí lze vyčíslit samotnou silovou únosnost jednotlivých svarů a tyto hodnoty porovnat s únosností běžně užívaných ohýbaných profilů. Z porovnání je okamžitě patrné, jakým největším silovým namáháním můžeme svařovaný třmínek zatížit, aniž by došlo k jeho destrukci.

Stanovení jmenovitého napětí ve svaru má zásadní význam pro návrh svarového spoje. Provést přesný výpočet jmenovitého napětí ve svarovém spoji je však problematické, protože přesná analýza průběhu napětí ve svaru je takřka nemožná. Pomocí zjednodušených vzorců založených na znalosti teorie pružnosti a pevnosti se vypočítá průměrné jmenovité napětí v určeném průřezu svarového spoje vyvolané všemi působícími silami a momenty. Díky zjednodušení se ve výpočtu nezohledňují například špičky napětí ani případná vnitřní pnutí či velké vruby v okolí svaru. Je zde však zohledněn vliv malých vrubů, a to nižší hodnotou dovoleného napětí.

16. Součinitele bezpečnosti svařování

Jelikož přesný průběh svarových pnutí není známý a únosnost je ovlivněna průběhem reziduálních pnutí, změnou silového toku a geometrií svaru, musí být aproximované napětí spočtené na straně bezpečnosti. K tomu slouží součinitele bezpečnosti.

Jedním z nejdůležitějších součinitelů bezpečnosti je: Součinitel mnohokrát opakovaného zatížení – součinitel γ_{sc} . Tento výpočet je založen na znalosti Wöhlerových křivek. Po doplnění experimentálně určené křivky životnosti o faktory ovlivňující únavu tělesa se obdrží konstrukční křivka (rovnice) životnosti, použitelná pro reálné těleso. V oblasti vysokocyklové únavy se používají modifikované křivky životnosti Wöhlera. Získaným součinitelem lze přímo redukovat hodnotu povoleného namáhání a přibližovat se tak hodnotám časové pevnosti. Součinitelé se odvíjí z předpokládaného chování při určitém počtu opakování a z mezní hodnoty cyklu napětí v betonářské výztuži.

17. Obloukové svařování – přeplátovaný spoj

Z dříve popisovaného schématu (*Obr.12*) je patrné, že u rohových spojů základních obvodových matic třmínků dochází k dvojosému kroucení svaru. Na toto zatížení nejsou svary běžně dimenzovány, a tak je jejich únosnost obtížné stanovit. Při snaze stanovit tuto únosnost dochází k razantnímu zvýšení napětí ve svaru, a tak ke snížení bezpečnosti. Alternativou pro tuto oblast třmínku jsem zvolil předohýbanou svařovanou matici technologií jednostranného přeplátovaného svaru. Alternativ a možností výroby svařovaného třmínku je samozřejmě několik.

Přeplátovaný svar umožňuje umístit svar do méně exponovaných částí třmínku. Mimoto je svou geometrií uzpůsoben k vytvoření dlouhého svaru s uživatelsky volenou únosností. U ostatních použitých typů svaru lze únosnost také ovlivnit, bohužel je zde ale možnost zvětšovat a upravovat geometrii svaru předem předepsána velikostí a stykem svařovaných profilů.

18. Vyhodnocení únosnosti

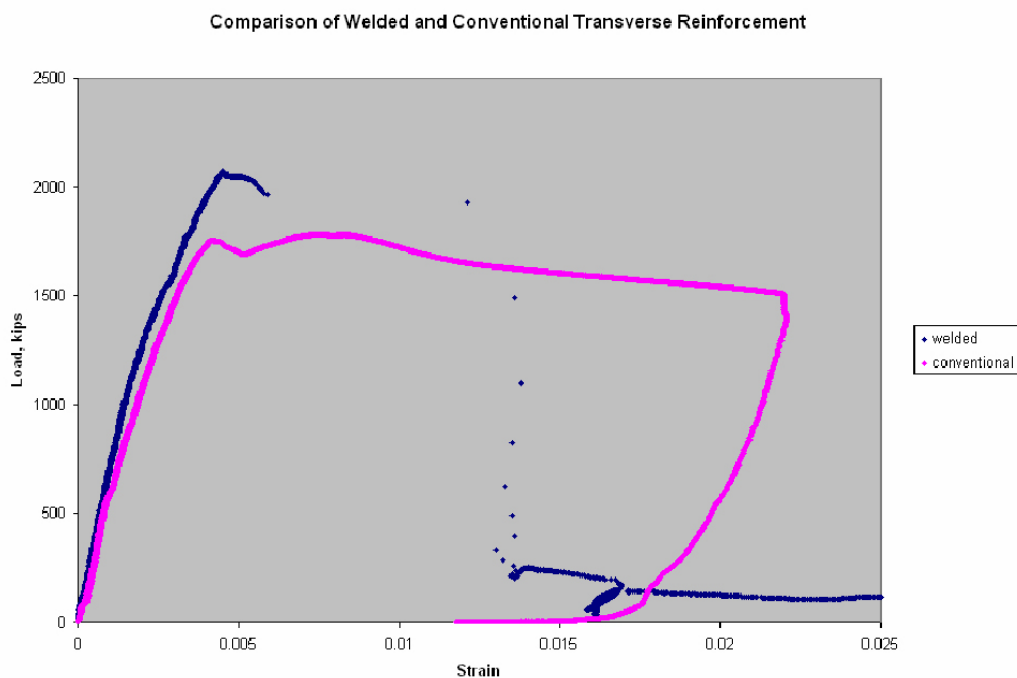
V rámci této práce vznikla softwarová aplikace s názvem WRG, která napomáhá k určení únosnosti nosných svarových spojů betonářských profilů. Dopředu musím podotknout, že vyhodnocené výsledky jsou závislé na mnou zvolených materiálech a mnou zvolené geometrii a parametrech svaru. Při jiné definici vstupních parametrů může uživatel dostat jiné výsledky. Mou snahou bylo zpřístupnění technologie WRG v popisovaných odvětvích stavebnictví a zároveň všemi zvolenými parametry ctít technické standardy. Výsledné srovnání (*Obr.18*) poukazuje na fakt, že spočtená únosnost svarových spojů nedosahuje únosnosti ohýbaných profilů. Východiskem při návrhu je využití adekvátního množství profilů, které pokryje rozdíl výpočtové únosnosti svařovaných a ohýbaných profilů, nebo použít větší profil výztuže pro svaření a dosáhnout vyšší únosnosti svařovaného třmínku.

Technologie svařování	Geometrie svaru	Umístění svaru	Zatížení	Poměr únosnosti
Obloukové svařování	Křížový svar - kolem celého styku	Dělicí (vnitřní) profil	Statické	75%
		Dělicí (vnitřní) profil	Cyklické (Dynamické)	60%
		Obvodová (základní) matrice	-	-
Obloukové svařování	Křížový svar - 2 V svary na styku	Dělicí (vnitřní) profil	Statické	40%
		Dělicí (vnitřní) profil	Cyklické (Dynamické)	29%
		Obvodová (základní) matrice	-	-
Obloukové svařování	Překládaný svar - jednostranný	Dělicí (vnitřní) profil	-	-
		Obvodová (základní) matrice	Statické	100%
		Obvodová (základní) matrice	Cyklické (Dynamické)	100%
Odporové svařování	Křížový svar - bodový	Dělicí (vnitřní) profil	Statické	52%
		Dělicí (vnitřní) profil	Cyklické (Dynamické)	40%
		Obvodová (základní) matrice	-	-

Obr.18: Vyhodnocení spočtené únosnosti aplikací WRG

Tyto výsledky jsou nepříznivé a vyvracejí popisované klady technologie WRG zveřejněné firmou Baugrid. Na obhajobu této technologie bych chtěl uvést interakční diagram (*Obr.19*) zatěžování fyzikálního modelu při testech technologie WRG v USA na Univerzitě v Berkley. V tomto testu šlo o dosažení meze únosnosti dvou sloupů zatížených hydraulickými lisami (zvětšující se působící centrický tlak) na oba sloupky. Oba sloupky obsahovaly stejnou betonovou směs. Podélné vyztužení bylo také shodné. Rozdílné bylo příčné vyztužení. Oba sloupky měly stejný stupeň příčného vyztužení. Mimoto smykové třmínky měly i stejný tvar a průměr, co se týče profilu obvodové matrice a dělicích profilů. Rozdílem byla technologie výroby třmínku. Jednalo se o konvenční ohýbaný třmínek, který byl vyroben podle návrhu smykové výztuže americké ACI normy a svařovaný třmínek WRG vyrobený dle postupu firmy Baugrid.

V interakčním diagramu (*Obr.19*) je průběh zatěžování konvenčního třmínku vyznačen fialovou barvou a průběh svařovaného třmínku barvou modrou. Praktické testy vykazují vyšší únosnost svařovaných třmínků. Problémem je viditelná nižší houževnatost a přetvárnost prvku. Po překročení mezní deformace dochází ke křehkému lomu a rychlému kolapsu, zatímco ohýbané profily stále vykazují mnohem vyšší přetvoření. Z podkladů jsem se dozvěděl i deformaci svařovaných profilů na mezi únosnosti. Protážení bylo 0,28 palce, což odpovídá přibližně hodnotě 7,11 mm. To je dostatečná deformace, která varuje osoby před hrozícím kolapsem, a tak i tato hodnota může být považována za dostatečnou. Při mé volbě materiálů a vhodném použití svarů se dá očekávat ještě příznivější chování a zmenšení vlivu náhlého kolapsu.



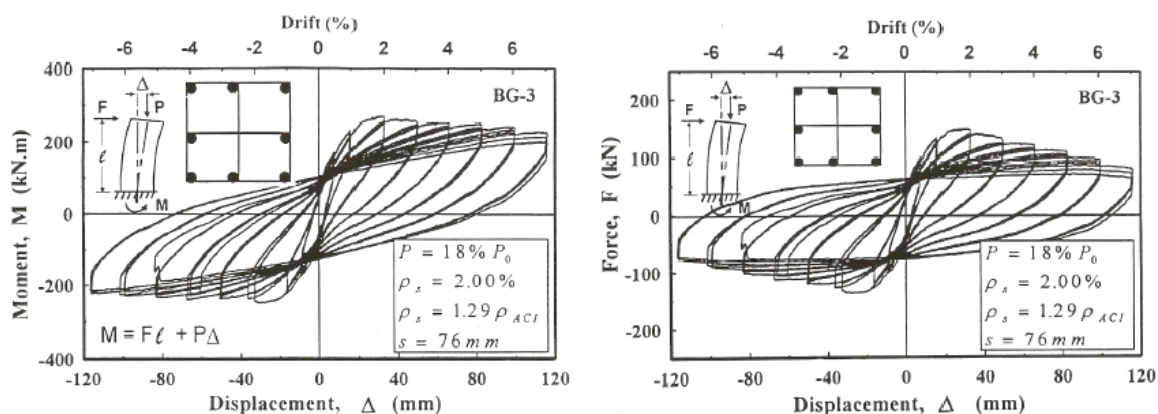
Obr.19: Interakční diagram (závislost napětí na relativním přetvoření) testovaných sloupů v Berkley, USA

Pořízené a vypočtené výsledky poukazují na nesoulad výpočtu a praxe. Neznamená to však, že dlouhá léta používaný výpočet svarových spojů betonářských vložek je neplatný. Jedná se pouze o příliš konzervativní přístup k problematice svařování výztuže. Asi i z tohoto důvodu nejnovější normová ustanovení (ČSN EN ISO 17660-1) předepisují na každý nosný svarový spoj udělat předepsaný počet normových zkoušek před jeho používáním v praxi. Alternativou výpočtu pro tuto technologii je vytvoření dostatečného počtu zkušebních vzorků a v souladu s touto normou odzkoušet potřebný počet testovacích spojů. Na základě pořízených výsledků je možné lehce upravit funkční software a přiblížit se tak reálným hodnotám i s dostatečnou mírou bezpečnosti. Takovýto projekt je však časově i finančně velmi náročný a tak bohužel nemohl být v rámci této diplomové práce realizován. Je to však dobrou otázkou a námětem pro další možný výzkum v této oblasti.

19. Závěr

Nejlepším příkladem platnosti teorie je názorná ukázka. Z tohoto důvodu bych chtěl podotknout, že technologie WRG byla mnohokrát využita pro nosné konstrukce náročných staveb. Příkladem je poslední realizace, kterou je Millenium Tower v San Francisku, Kalifornii, USA. Jedná se o 60-ti patrovou budovu s nosným železobetonovým skeletem, která je lokalizována ve 4. seismické zóně. Svou podlažností a výškou se tak stala nejvyšší železobetonovou stavbou v celé Kalifornii.

Rozsáhlé testy technologie WRG na univerzitě v Ottawě, prokázaly velkou odolnost konstrukcí vůči seismickým účinkům, které byly simulovány testem nízkocyklové únavy při zkouškách série nosných železobetonových sloupů. Průběh testu a některé z výstupů jsou vidět přiložených podkladech (*Obr.20 a Obr.21*). Při těchto zkouškách byla prokázána velká odolnost prvku a tedy i armatury obsažené ve zmiňovaných sloupech.



Obr.21: Závislost ohybového momentu a příčné síly na vychýlení typového sloupu



Obr.22: Poškození konstrukce při 2 % , 3 % , 4 % a 6 % příčného vychýlení

Výpočetní metody v českých technických normách nepovolují dostatečné využití nosných svarových spojů a poukazují na možný nevhodný návrh. Z tohoto důvodu i ekonomické zhodnocení vykazuje nepříznivé výsledky. Použití technologie za těchto okolností je možné, ale vede k nákladnějšímu návrhu. V této souvislosti je nutné použít obloukového svařování, které se běžně provádí obalovou elektrodou. Řešení pro tuto technologii nabízí norma ČSN EN ISO 17660-1, která umožňuje prokázat únosnost sérií normových zkoušek a následně ji uvést do výroby. V rámci těchto testů mohou být výsledky upraveny pro úpravu aplikace WRG, která momentálně poskytuje konzervativní návrh zaštitěný platnou výpočetní metodou.

20. Seznam Literatury

1. Prudký J. a kolektiv: Teorie a metodika svařování. Skriptum ČVUT, Praha 1986.
2. Majer L., Podhora J., Suchánek M., Vejvoda S.: Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení. ZEROSS, CWS ANB, Ostrava 1999.
3. Foldyna V., Koukal J., Pilous V., Purmenský J., Schwarz D.: Materiály a jejich svařitelnost. ZEROSS, CWS ANB, Ostrava 1999.
4. Barták J., Kovařík L., Pilous V. a kolektiv: Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory. ZEROSS, Ostrava 2002.

5. Pošvářová M.: TP193 – Svařování betonářské výztuže a jiné typy spojů. Mott MacDonald, Praha 2008.
6. ČSN EN ISO 17660-1: Svařování betonářské oceli – Část 1: Nosné svarové spoje. Český normalizační institut, 2007.
7. ČSN EN ISO 17660-2: Svařování betonářské oceli – Část 2: Nenosné svarové spoje. Český normalizační institut, 2007.
8. ČSN EN 10080: Ocel pro výztuž do betonu – Svařitelná betonářská ocel - Všeobecně. Český normalizační institut, 2005.
9. ČSN EN 1992-1-1 - Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut, 2006.
10. ČSN 73 1201: Navrhování betonových konstrukcí. Úřad pro normalizaci a měření, Praha 1986.
11. Hlavatý I., VŠB: [<http://fs1.vsb.cz/~hla80/>]
12. Matthew Rood, Jack P. Moehle. Investigation of Welded Reinforcement Grids. University of California, Berkeley, USA; University of Florida, USA.
13. Sastcioglu, M. and Grira, M.: Concrete Columns Connected with Welded Reinforcement Grids. Ottawa Carleton Earthquake Engineering Research Center – Report OCEER 96-05, 1996.
14. Hanns U. Baumann, inventor of the BauGrid WRG Concrete Reinforcement. Bautech Advancing Construction, 2009. [<http://www.bautech.com/HUB.htm>]
15. CV for Hanns Baumann, S. E. – Concrete reinforcement innovator, 2009. [<http://www.bau-eng.com/cvs/hubcvproddev.htm>]
16. BauGrid Construction System Projects – Millennium Tower San Francisco. BauTech – Advancing Construction, 2009. [<http://www.bautech.com/projects/millennium.htm>]
17. Evolving Technology for Design and Construction of More Efficient Concrete structures. BauTech – Advancing Construction, 2009.
18. Three Test Programs Show That Welded Reinforcement Grids Correct Unsound Detail In Seismic Designs, 2006. [<http://www.bautech.com/papers/CBC2k6c.pdf>]
19. Introducing BauGrid. BauGrid Welded Reinforcement grid, 2009. [http://www.baugridusa.com/html/introducing_baugrid.html]
20. Baugrids. BauTech Advancing Construction, 2009. [<http://www.bautech.com/bautechwebsite/competitive.html>]