



Spolufinancováno
z programu Evropské unie
Erasmus+



Erasmus+

MODUL A

Úvod do problematiky svařování kovů

Tepelně ovlivněná oblast svarových spojů



Tepelně ovlivněná oblast svarových spojů

- ▶ Tepelně ovlivněná oblast (TOO) vzniká svařováním.
- ▶ Při svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (Cu, Ni, Al) se mikrostruktura v TOO nemění.
- ▶ Zde dochází pouze ke změnám substruktury, rekrytalizaci nebo růstu zrn.
- ▶ Při svařování ocelí se mění mikrostruktura v TOO.



Na přeměny má zejména vliv:

1. chemické složení ocelí,
2. původní mikrostruktura,
3. teplotní cykly (rychlost ohřevu, rychlost ochlazování).



Pásmo částečné překrystalizace definované teplotami Ac1 a Ac3

- ▶ U nelegovaných nízkouhlíkových ocelí s feriticko perlitickou strukturou nezačíná transformace perlitu na austenit při rovnovážné teplotě Ac1, ale při teplotě vyšší.
- ▶ Teplotní hysterese je tím větší, čím větší je rychlost ohřevu v první fázi teplotního cyklu.
- ▶ Po dosažení teploty přeměny perlit transformuje postupně na austenit.
- ▶ Protože je tato přeměna závislá na rychlosti difúze je nutný i k částečné transformaci, odpovídající určité teplotě mezi Ac1 – Ac3, určitý čas.
- ▶ Transformace proto neprobíhá v celém objemu zrna perlitu najednou.
- ▶ Z již přetransformovaného austenitu difunduje uhlík do okolního dosud netransformovaného feritu.



Pásmo částečné překrystalizace definované teplotami Ac1 a Ac3

- ▶ Účinkem difúze uhlíku přes hranice zrn se zároveň drobí původní feritická zrna.
- ▶ Podle výše dosažené teploty mezi Ac1 a Ac3 můžeme ve struktuře rovněž pozorovat určitý objem původní netransformované struktury, která je vysoce popuštěna.
- ▶ V důsledku těchto změn vzniká v pásmu částečné překrystalizace nehomogenní struktura co do velikosti zrn i produktů transformace po ochlazení.



Pásmo částečné překrystalizace definované teplotami Ac1 a Ac3

- ▶ Odlišný charakter struktury má v pásmu ohřátém na teploty Ac1 – Ac3 svarový spoj zušlechtěných ocelí.
- ▶ V důsledku kalení a popuštění je výchozí struktura zpravidla tvořena vysoko popuštěným martenzitem.
- ▶ V porovnání s feriticko-perlitickou strukturou má zušlechtěná ocel rovnoměrnější rozdělení uhlíku.



Precipitace v tepelně ovlivněné oblasti

- K významným změnám v precipitaci karbidů, nitridů a karbonitridů dochází v tepelně ovlivněné oblasti.
- V uhlíkových konstrukčních ocelích mohou nitridy precipitovat při teplotách pod A_c1 .
- Precipitace nitridu $Fe_{16}N_2$ při teplotě okolí je známá jako stárnutí ocelí.
- Stárnutí oceli může nastat i při teplotách 200 °C až 300 °C je-li ve struktuře volný dusík.
- Maximální rozpustnost N v železe je závislá na teplotě.
- Proto při rychlém ochlazení TOO při svařování může vzniknout přesycený tuhý roztok N v železe alfa.



Precipitace v tepelně ovlivněné oblasti

- ▶ Po několika dnech pak může z přesyceného tuhého roztoku precipitovat nitrid Fe_{16}N_2 , který je příčinou stárnutí.
- ▶ Pevnostní vlastnosti této zóny se sice zvyšují, ale její plasticita klesá.
- ▶ V první fázi atomy N segregují na dislokacích a snižují jejich pohyblivost.
- ▶ Ve druhém stadiu precipitují nitridy Fe_{16}N_2 na dislokacích a ve třetím stadiu precipitují nitridy v celém objemu zrna oceli.
- ▶ Tento jev není v současné době již tak nebezpečný, protože u většiny konstrukčních uhlíkových ocelí se novými metalurgickými postupy podařilo snížit obsah N v oceli, nebo je volný dusík vázán na stabilní nitridy např.: AlN , TiN apod.



V systému Fe-N mohou v a železe precipitovat nitridy:

- ▶ Fe_3N , Fe_6N_2 při teplotě okolí nebo do teploty $200\text{ }^\circ\text{C}$ až $250\text{ }^\circ\text{C}$,
- ▶ Fe_4N do teploty cca $450\text{ }^\circ\text{C}$.



Tepelně ovlivněná oblast svarových spojů

- Stárnutí se projeví zejména zvýšením tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti.
- Mikrolegované oceli jsou oceli legované Ti, Al, Nb a V v množství do 0,15 %.
- To jsou prvky, které tvoří s uhlíkem a N stabilní karbonitridy (Al pouze nitrid AlN), které zjemňují zrno oceli a disperzně zpevňují ocel.
- Velikost těchto precipitátů je 20 nm až 100 nm.



V ohřevové části teplotního cyklu tyto částice nejdříve koagulují (hrubnou) a při dosažení ještě vyšších teplot se rozpouštějí:

- Karbidy titanu 1150 °C
- Karbidy niobu 1150 °C
- Karbidy vanadu 1100 °C
- Nitridy hliníku 1350°C



Precipitační procesy ve svarových spojích:

1. zvyšují jejich pevnostní vlastnosti a žárupevnost (zejména precipitace malých částic typu *MX* v CrMoV ocelích),
2. váží volný dusík, tím snižují nebezpečí stárnutí svarových spojů,
3. snižují plasticitu svarových spojů



Tepelně ovlivněná oblast svarových spojů

- ▶ Proto je nutné při návrhu technologie svařování precipitačně zpevněných ocelí věnovat mimořádně velkou pozornost teplotnímu režimu při svařování, zejména tepelnému zpracování svarových spojů po svaření.
- ▶ Popouštěcí teplotu je nutné volit tak, aby se dosáhlo optima pevnostních i plastických vlastností svarového spoje.
- ▶ Popustíme-li svarový spoj precipitačně zpevněné oceli na nízkou teplotu nedosáhneme rovnovážného stavu mikrostruktury.



Tepelně ovlivněná oblast svarových spojů

- ▶ Plastické vlastnosti svarového spoje budou nízké a může dojít k jejich dalšímu snížení sekundárním vytvrzováním při zvýšených pracovních teplotách svarového spoje.
- ▶ Sekundární vytvrzování je způsobeno další precipitací vytvrzujících částic z tuhého roztoku.
- ▶ Vysoké popouštěcí teploty zvyšují plastické vlastnosti, ale snižují pevnostní vlastnosti svarových spojů.
- ▶ Svarové spoje popuštěné na vysoké teploty již obvykle sekundárně nevytvřují.



Zhrubnutí zrna v pásmu přehřátí TOO

- Po úplné transformaci nebo po rekrytalizaci v kovech bez polymorfni přeměny nejsou zrna v rovnováze z důvodu povrchového napětí hranic zrn.
- Velká zrna mají snahu růst na úkor malých zrn. Výsledkem tohoto procesu je zhrubnutí zrna.
- Hrubnutí zrn mohou účinně bránit precipitáty (karbidy nebo karbonitridy legujících prvků) nebo vměstky přítomné na hranicích zrn až do teploty, kdy se rozpustí.
- Proto pozorujeme hrubnutí zrn pouze v pásmu přehřátí TOO, ve kterém jsou dostatečně vysoké teploty pro rozpouštění precipitátů.
- Teplotě, při které dojde k rozpouštění precipitátů a zrna začne výrazně hrubnout, říkáme teplota přehřátí.



Zhrubnutí zrna v pásmu přehřátí TOO

- ▶ Teplota přehřátí závisí na typu precipitátů na hranicích zrn a jeho teplotní stabilitě.
- ▶ Není proto u všech ocelí stejná.
- ▶ Nejčastěji se uvádějí v podmínkách svařování tj. při rychlých změnách teploty v závislosti na čase a krátkých výdržích na vysokých teplotách (pouze několik vteřin) následující orientační teploty přehřátí:
 - ▶ nízkouhlíková ocel 1050 °C,
 - ▶ nízkolegovaná CrMoV ocel 1200 °C,
 - ▶ mikrolegované oceli až 1350 °C.



Základní typy vměstků v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje

- ▶ U ocelí rozlišujeme dva základní typy vměstků – oxidy a sulfidy.
- ▶ Oxidy vznikají již ve stádiu tavení oceli v periodě oxidace.
- ▶ Oxidy však přechází do strusky.
- ▶ Oxidy bývají v TOO velmi stabilní a nerozpouštějí se ani při nejvyšších teplotách ovlivnění.
- ▶ Disperzní oxidy mohou bránit pohybu hranic zrn a tím brzdit růst zrn v pásmu přehřátí. .



Základní typy vměstků v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje

- Oxidy mohou také tvořit zárodky při vylučování feritu z austenitu během transformace.
- Obsahují-li však oxidy vyšší podíl FeO nebo jiné složky s nižší teplotou tavení, mohou se v pásmu přehřátí rozpouštět.
- Potom přispívají k náchylnosti na vznik teplých trhlin (likvační praskavost).
- Nízkotavitelné oxidy mohou být rovněž příčinou tvorby pórů ve svarovém kovu, zejména u těch technologií svařování, u kterých je svarový kov tvořen z velké části základním materiálem např. při svařování pod tavidlem.



Základní typy vměstků v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje

- ▶ Obvykle se jako vměstky v oceli objevují sulfidy například MnS s teplotou tavení 1610 °C nebo FeS s teplotou tavení 988 °C.
- ▶ Sulfidy se mohou v pásmu přehřátí TOO rozpouštět a vzniklá tavenina penetruje na hranice y zrn a je metalurgickou příčinou praskavosti oceli za tepla.
- ▶ Sulfidy jsou nejčastější příčinou likvační praskavosti oceli.
- ▶ Podobné vlastnosti mají i karbosulfidy a sulfonitridy.
- ▶ Vliv sulfidů na svařitelnost ocelí je proto nepříznivý.
- ▶ Sulfidy způsobují jak praskavost za tepla, ale také lamelární a žíhací praskavosti.



Pásma v tepelně ovlivněné oblasti a jejich vlastnosti

- ▶ Pásmo částečné překrytí
- ▶ Pásmo normalizace tepelně ovlivněné oblasti
- ▶ Pásmo přehřátí



Pásmo částečné překrystalizace

- ▶ Pokles pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů je zřejmý zejména při svařování zušlechtěných a termomechanicky zpracovaných ocelí.
- ▶ Menší snížení pevnosti můžeme také pozorovat i u jiných ocelí v pásmu částečné překrystalizace TOO při teplotách těsně nad A_c1 a v základním materiálu ovlivněném teplotními cykly při svařování na teplotu těsně pod A_c1 .
- ▶ Důvodem je vysoký stupeň popuštění mikrostruktury a rekrystalizace.
- ▶ V tomto pásmu dosahujeme nejnižší hodnoty R_m , R_e a HV_{10} z celé TOO svarového spoje, naopak hodnoty KCV , A_5 a Z jsou zde obvykle nejvyšší z celé TOO.



Pásmo normalizace tepelně ovlivněné oblasti

- ▶ V tomto pásmu, které je dáno teplotami A_{c3} až teplota přehřátí nedochází ke hrubnutí austenitických zrn v ohřevové části teplotního cyklu při svařování, protože teplota ovlivnění je nižší než teplota přehřátí.
- ▶ Vyznačuje se jemným zrnem, a proto je také někdy označováno jako jemnozrnná oblast TOO.
- ▶ Rychlosti ochlazování v ochlazovací části teplotního cyklu při svařování jsou jen o málo větší než rychlosti ochlazování při normalizaci základního materiálu před svařováním.
- ▶ Mikrostruktura tohoto pásma je méně zakalená než v pásmu přehřátí.
- ▶ Proto mechanické hodnoty tohoto pásma jsou srovnatelné nebo o něco vyšší než ve svařovaném normalizovaném základním materiálu.
- ▶ Je to pásmo, kde se dosahuje optimálního poměru pevnostních a plastických vlastností.



Pásmo přehřátí

- ▶ V pásmu přehřátí působí tyto dva faktory:
 - ▶ Velké zpevnění materiálu způsobené velkými rychlostmi ochlazování z austenitizační teploty, které vedou ke vzniku přesycených martenziticko-bainitických struktur s vysokými pevnostními a nízkými plastickými vlastnostmi.
 - ▶ Zhrubnutí zrna, které způsobuje snížení pevnostních vlastností a vede ke snížení plastických vlastností.
- ▶ Na mechanické vlastnosti tohoto pásma tepelně ovlivněné oblasti má transformační zpevnění velký vliv.
- ▶ Pásmo přehřátí se vyznačuje nejvyššími hodnotami R_m , R_e a HV10 z celé tepelně ovlivněné zóny svarového kovu.