

# OPRAVY SVAŘOVÁNÍM TURBÍNOVÝCH KOMPONENT SKŘÍNÍ Z CREEPOVĚ ODOLNÝCH OCELÍ

## WELDING REPAIR OF TURBINE COMPONENT FROM CREEP RESISTANCE STEELS

Marek Slováček<sup>a)</sup>, Josef Tejc<sup>a)</sup>, Tomáš Richter<sup>a)</sup>, Jaromír Moravec<sup>b)</sup>, David Beran<sup>c)</sup> a Jan Čech<sup>d)</sup>

<sup>a)</sup> MECAS ESI s.r.o, Brojova 16, 326 00 Plzeň

<sup>b)</sup> Technická univerzita v Liberci, Studentská 1402/2, 461 17 Liberec

<sup>c)</sup> SIEMENS s.r.o., Olomoucká 7/9, 618 00 Brno

<sup>d)</sup> ŽĐAS a.s., Strojírenská 675/6, 591 01 Žďár nad Sázavou

### Abstrakt

Během výroby, a i provozu turbínových komponent, a dále i jejich výroby, např., odlévání turbínových skříní vznikají vady, jak povrchové, tak i podpovrchové, které je třeba opravit. Společnosti SIEMENS, ŽĐAS a MECAS ESI pracují na vyvinutí technologií oprav na základě provádění experimentálních svarů, materiálových měření a numerických simulací. V předkládaném článku bude uveden celý program řešení pro opravné svařování turbínových komponent z oceli G17CrMoV5-10, G17CrMo5-5, X10CrMoVN9-1, GX23CrMoV12-1. Uvedený výzkum je prováděn i za podpory projektu MPO TRIO FV10510.

During manufacturing and nominal regime and casting of turbine components the surface and under surface cracks have been initiated. The cracks should be repaired. The companies SIEMENS, ŽĐAS and MECAS ESI have been working for welding technologies development based on material measurements, small mock ups experiments and numerical simulations. The complete technology development programs have been done for materials G17CrMoV5-10, G17CrMo5-5, X10CrMoVN9-1, GX23CrMoV12-1.

### Úvod

Cílem celého projektu je vytvoření nových metodických postupů svařování a tepelného zpracování creepově odolných turbínových komponent, definujících posloupnost kroků potřebných při návrhu a realizaci nízkoteplotních oprav vad způsobených výrobními postupy, případně provozním zatížením. Jde o vytvoření technologických postupů (ověřených technologií), které budou odzkoušeny na reálných dílech a zařazeny do výrobního programu společnosti Siemens (odštěpný závod Industrial Turbomachinery v Brně).

Uvedené postupy budou realizovány pro 4 různé creepově odolné materiály G17CrMo5-5, G17CrMoV5-10, GX23CrMoV12-1 a GX12CrMoVb9-1.

Hlavním cílem a současně i výstupem projektu je experimentální odzkoušení navržených postupů na reálných kusech, s následnou kvalifikací postupů certifikačními orgány, vytvoření WPQR a nastavení podmínek pro následné zavedení do výroby. Kvalifikované postupy oprav budou vytvořeny pro výše uvedené materiály jako výsledek celého projektu.

V roce 2016 byl proveden a ukončen kompletní vývoj opravných svařovacích technologií pro materiály G17CrMo5-5, G17CrMoV5-10 a v roce 2017 probíhá vývoj opravných svařovacích technologií pro materiály X10CrMoVN9-1, GX23CrMoV12-1. Ovšem v roce 2016 proběhl i vývojový projekt se společností ŽĐAS optimalizace opravy svařováním odlitku rotorových skříní z materiálu GX23CrMoV12-1.

V uvedeném článku bude popsán celkový postup řešení. Dále se článek bude detailněji zabývat numerickými metodami, které byly použity jako jedna z podpůrných činností projektu. Materiálovými experimenty a zkušebními svary se zabývá detailněji článek „Možnosti materiálových měření a experimentálních zkoušek pro oblasti energetiky -

posouzení vlivu svařovacího procesu na degradaci materiálu, autor Jaromír Moravec“, který je prezentován také na konferenci v Srni v roce 2017.

Hlavním benefitem používání numerických simulací svařování není obdržení pouze požadovaných výsledků (materiálová struktura, tvrdost, deformace, zbytkové napětí, celková plastická deformace), ale jde hlavně o pochopení celého procesu, co se během procesu svařování děje v materiálu. Ze zkušeností lze potvrdit, že na základě pochopení celého procesu je daleko snadnější udělat jakoukoliv změnu. Výhodou numerické simulace je, že lze získat kompletní informace během celého výrobního procesu a je možné se „podívat“ do materiálu a do jakéhokoliv místa na konstrukci, což je jinak nemožné. Je zřejmé, že ani sebelepší měření nezajistí stejné informace, jako numerická analýza. Navíc, lze na počítači provést několik variantních technologií a porovnat jejich výsledky, tzn., jejich rozdíly.

## **Postup řešení**

Celý projekt je složen z několik na sobě navazujících následujících činností:

### **Materiálové experimenty**

Pro každý materiál jsou, resp., byly provedeny následující materiálová měření:

- a) ARA diagram
- b) Tahové zkoušky základního materiálu s uvažováním vlivu teploty
- c) Tahové zkoušky jednotlivých struktur (převážně martenzit a bainit) s vlivem uvažování teploty
- d) Tahové zkoušky popuštěných struktur
- e) Stanovení koeficientu tepelné roztažnosti
- f) Naměření popouštěcího diagramu
- g) Provedení krátkodobých creep testů

Materiálová měření byla provedena s cílem získat maximální množství poznatků o použitých materiálech pro další rozhodování o navržených technologiích svařování a především jako podklad pro numerické analýzy svařování, tzn., k vytvoření materiálových databází a dále byly použity jako limitní hodnoty pro hodnocení možnosti vzniku vad.

### **Provedení kontrolních návarů**

Byly provedeny základní kontrolní návary, jak na desky, tak do drážek. Byly vždy provedeny všechny navržené varianty (různé teploty přehřevu, různé svařovací příkony, různé přídavné materiály, různé režimy tepelného zpracování atd.) a byly vždy vyhodnoceny makro výbrusy svaru a tepelně ovlivněné oblasti a měření tvrdosti (v případě, že bylo použito tepelné zpracování, tak tvrdost byla vždy měřena po svařování, a i po tepelném zpracování). Výsledky kontrolních svarů byly rovněž použity k validaci numerických řešení.

### **Numerické simulace kontrolních návarů**

Byly provedeny numerické simulace kontrolních návarů s cílem validovat numerické metody, tzn., především ověřit vytvořené materiálové databáze, dále nalézt správné parametry pro použité svařovací technologie. Ovšem, hlavním cílem je získat informace o procesu pro zvolené varianty technologií, tzn., stanovit pro jednotlivé technologické varianty výsledky jako jsou podíl materiálové struktury, tvrdost, zbytkové napětí a kumulativní plastická deformace ve svarovém spoji, tzn., jak ve svarovém kovu, tak i v teplotně ovlivněné oblasti.

### **Návrh finální technologie svařování oprav**

Na základě již provedených prací, tzn., materiálového měření, provedení kontrolních svarových spojů a numerických analýz je proveden návrh finální technologie opravy, který bude uskutečněn za téměř „reálných“ podmínek oprav, tzn., především jde o velikost opravované oblasti

### **Numerické simulace skutečných svarových spojů**

Byla provedena numerická analýza navržené finální opravy a byly uvažovány všechny reálné podmínky opravy, tzn., opět jde hlavně o velikost opravované oblasti. Na základě výsledků z numerické simulace bylo rozhodnuto o proveditelnosti reálné opravy jako finálního experimentu.

#### **Provedení skutečných svarových spojů**

Provedení simulované reálné opravy dle technologického postupu, který byl ověřen numerickou analýzou. Z provedené opravy, která byla podrobena NDT zkouškám, jsou odebrány i vzorky na experimentální zkoušky.

#### **Vytvoření ověřených technologií**

Vytvoření a potvrzení ověřených technologií

### **Numerické simulace svařování turbínových komponent z materiálu G17CrMo5-5**

V uvedené kapitole budou představeny možnosti a výsledky numerických simulací, které sloužily jako podpora vývoje technologie oprav svařováním turbínových komponent z materiálu G17CrMo5-5.

Dle programu vývoje technologií oprav, prvním krokem provádění numerických analýz byla validace materiálových databází a validace parametrů tepelných zdrojů. Na obr. 1 je uveden základní validační model návaru na desku a na obr.2 je uveden řez modelem, který odpovídá vyvaření drážky. Na uvedených výpočetních modelech byly převážně porovnávány velikosti natavených oblastí a velikosti teplotně ovlivněných zón a dále byla validována hodnota tvrdosti, vždy byly porovnány vypočtené hodnoty s experimentem. Na obr. 3-5 je uveden jeden z experimentálních návarů jednotlivých housenek pro různé technologické parametry a jednotlivé makro výbrusy. Na obr. 6 a 7 jsou uvedeny natavené oblasti (červená barva) a teplotně ovlivněné oblasti (zelená barva) pro navaření jedné housenky pro různé průměry elektrod, samozřejmě i pro jiné svařovací parametry. Na obr. 8 je uveden makro výbrus pro vyvaření drážky a na obr. 9 jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti v jednotkách Vickerse. Na obr. 10 je opět uvedená roztavená oblast a teplotně ovlivněná oblast pro navaření 10 vrstev do drážky. Na obr. 11 jsou uvedeny i hodnoty vypočtené tvrdosti v jednotkách Vickerse. Celkem v uvedené etapě byly provedeny 4 technologické varianty návarů na desku a 3 technologické varianty svařování do drážky. Na základě provedených variantních numerických analýz a experimentálních svarů byl navržen postup pro provedení finální opravy, do drážky 38 mm hluboké s použitím 4 svarových housenek. Byly použity 4 různé průměry elektrod s svařovací parametry. Dále byla použita teplota předehřevu 400 °C, teplota interpass 480 °C a po dohřevu následovalo nízkoteplotní tepelné zpracování na teplotě 550 °C. Na obr. 12 je uveden řez výpočtovým modelem. Na obr. 13 je uveden podíl martenzitické struktury ve svarovém spoji, zbytek do 100% odpovídá bainitické struktuře. Samozřejmě, uvedené struktury jsou silně popuštěné, díky tepelnému zpracování po svařování. Na obr. 14 jsou uvedeny numericky predikované tvrdosti dle Vickerse a maximální hodnota je okolo 330 HV. Na obr. 15 jsou uvedeny hodnoty redukovaného zbytkového napětí a maximální hodnota dle numerické analýzy dosahuje 700 MPa, což dle limitních hodnot z materiálového měření je pro uvedenou technologii a použité materiály v oblasti bezpečné a s vysokou pravděpodobností nevyvolá vznik vad z důvodu materiálové struktury a zbytkového napětí.

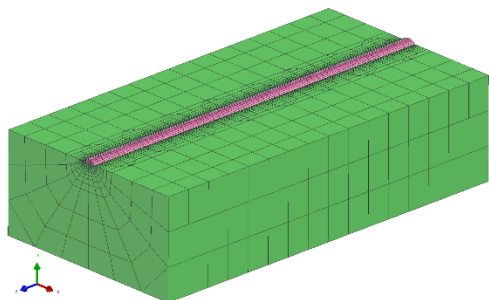
## Oprava turbínové skříně z materiálu GX23CrMoV12-1

Na odlitcích turbínových komponent z materiálu GX23CrMoV12-1 jsou nalezeny vady, které je potřeba opravit. Bohužel, i během oprav se opět objevují vady, většinou podpovrchové vady ve větší hloubce nebo v místech, kde je kumulace více vad na malém prostoru. Uvedený projekt byl proveden pro společnost ŽDAS. Na uvedeném projektu je zřejmý benefit použití numerické analýzy z důvodu možnosti analýz jednotlivých variant s cílem pochopení procesu a chování materiálu. Na obr. 16 je uveden výpočtový model, kde byly uvažovány tři opravné svary, pro hlubokou podpovrchovou vadu (oblast 1), pro dlouhou podpovrchovou vadu (oblast 2) a pro opravu návarem na povrch (oblast 3).

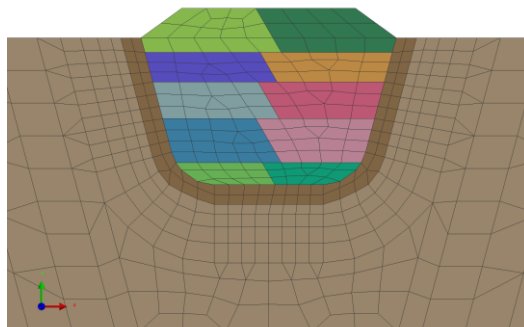
Jako první analýza, varianta 1, byla provedena varianta dle WPS, tzn., s ideálními podmínkami, tzn., jde hlavně o teplotu předehřevu 300 °C a teplotu interpass 400 °C. Výsledná struktura v opravných svarech byla převážně bainiticko s malým množstvím martenzitu, viz obr.17. Na vypočtených výsledcích nebyly identifikovány žádná místa s možnostmi vzniku vad, protože maximální hodnota redukovaného zbytkového napětí byla okolo 600 MPa, viz obr.20. Další numerická analýza, varianta 2, byla provedena pro variantu teploty předehřevu 200 °C a interpass teplotu 300 °C. Uvedená varianta byla provedena z důvodu, že při reálné opravě je velmi obtížné obdržet parametry teploty předehřevu 300 °C a teploty interpass 400 °C a chtěli jsme identifikovat rozdíly ve výsledcích pro uvedené varianty. Materiálová struktura v opravovaných částech je již plně martenzitická, viz obr. 18. Maximální hodnota redukovaného napětí je okolo 800 MPa, viz obr.21, což stále pro uvedený materiál není kritická hodnota. Navíc vady, které vznikaly během oprav, se vyskytovaly v přídatném materiálu, ale numerické analýzy identifikují maximální hodnoty v teplotně ovlivněné oblasti. Na základě uvedených výsledků jsme se zaměřili na přídatný materiál Chromet 12MV, který dle intervalu chemického složení by měl být podobný jako základní materiál. Ovšem dle dodaného atestu byly identifikovány rozdíly. Byla numericky stanovena a potom i experimentálně ověřena teplota martenzitu start pro přídatný materiál 280 °C, což je o 30 °C výše než pro základní materiál, což bylo použito i v původních numerických analýzách. V třetí numerické analýze, variantě 3, byla použita teplota předehřevu 200 °C, interpass teplota 300 °C a hlavně byla změněna teplota martenzitu start pro přídatný materiál z 250 na 280 °C. Výsledky redukovaných napětí jsou uvedeny na obr. 22. Z obr. 22 je zřejmý výrazný nárůst redukovaného napětí v přídatném materiálu na 1100 MPa, což je hodnota na mezi pevnosti uvedeného materiálu (informace přebrána z materiálových měření uvedené oceli), tzn., je zde i velká pravděpodobnost vzniku vad. Numerická analýza odhalila velký vliv teploty martenzit start na hodnotu zbytkové napjatosti, tzn., i následné správné použití teploty předehřevu a interpass teploty. Je velmi překvapující, že relativně malá změna teploty martenzit start o pouhých 30 °C vyvolá, tak výrazný nárůst zbytkové napjatosti. Je zřejmé, že u uvedené oceli, resp. obecně martenzitických ocelí je potřeba teplotu předehřevu a interpass teplotu optimalizovat dle skutečného chemického složení oceli, tzn., hlavně dle teploty martenzit start a nelze používat jednu teplotu obecně.

## Závěr

V článku byl představen postup návrhu vývoje oprav turbínových komponent. Vývoj byl, resp. stále je zaměřen na creepově odolné materiály G17CrMo5-5, G17CrMoV5-10, GX23CrMoV12-1 a GX12CrMoVNb9-1. Kompletní vývojový program zahrnoval jak experimentální měření, tak provedení kontrolních svarů, tak i provedení reálné zkoušky opravy svařováním. Dalším podpůrným prostředkem ve vývoji oprav turbínových komponent byly i numerické simulace svařování, na které byl zaměřen uvedený příspěvek. Bylo provedeno stručné shrnutí provedených prací, které bylo demonstrováno na vývojovém projektu pro materiál G17CrMo5-5 a industriálním projektu pro materiál GX23CrMoV12-1.



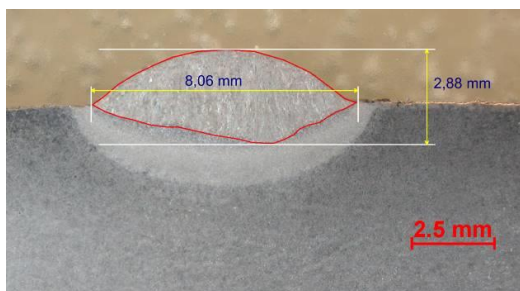
Obr.1 Výpočetní model návaru na desku



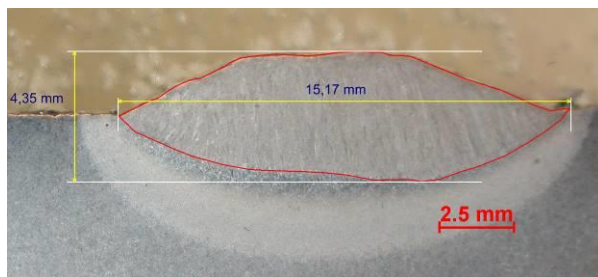
Obr.2 Výpočetní model v řezu navařování do drážky



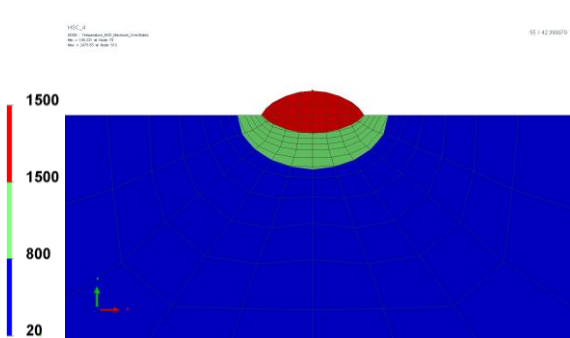
Obr. 3 Provedené experimentální svary pro různé technologické parametry



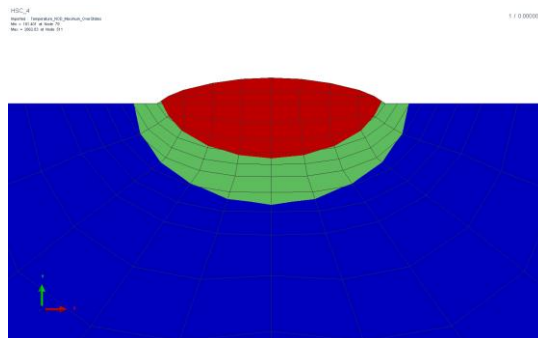
Obr.4 Makro výbrus, elektroda  $\phi$  2,5 mm



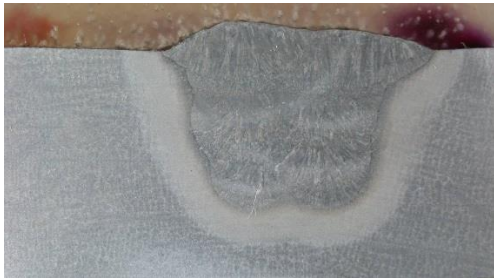
Obr.5 Makro výbrus, elektroda  $\phi$  5 mm



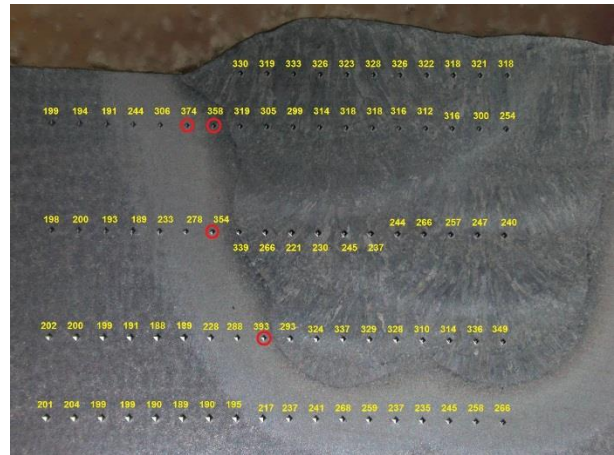
Obr.6 Teplotní pole, elektroda  $\phi$  2,5 mm



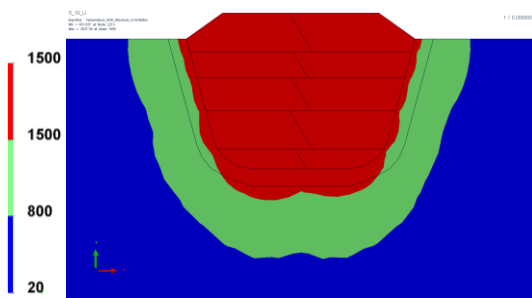
Obr.7 Teplotní pole, elektroda  $\phi$  5 mm



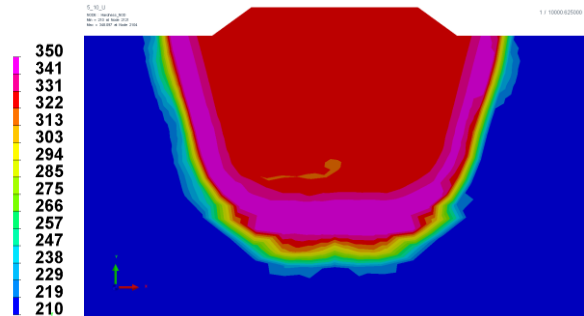
Obr. 8 Makro výbrus, vyvaření drážky



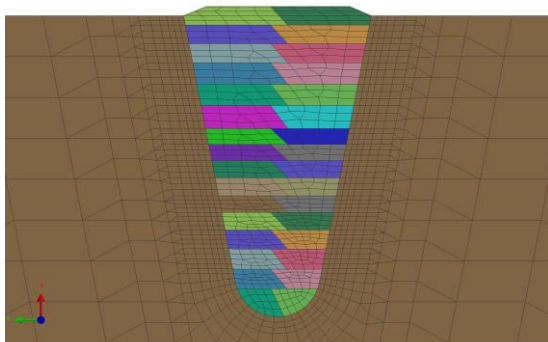
Obr. 9 Měření tvrdosti HV, vyvaření drážky



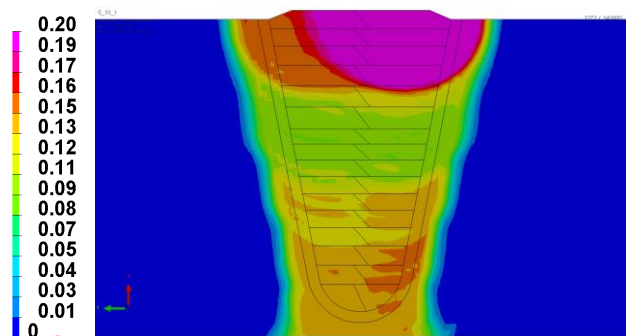
Obr.10 Teplotní pole, vícevrstvý návar



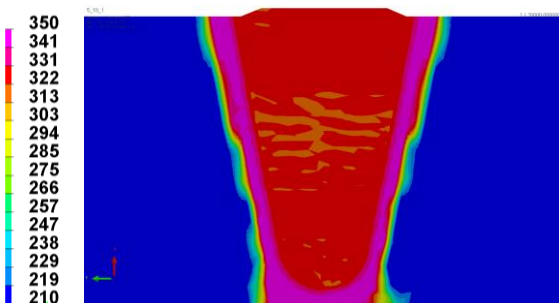
Obr.11 Tvrdosti v jednotkách HV



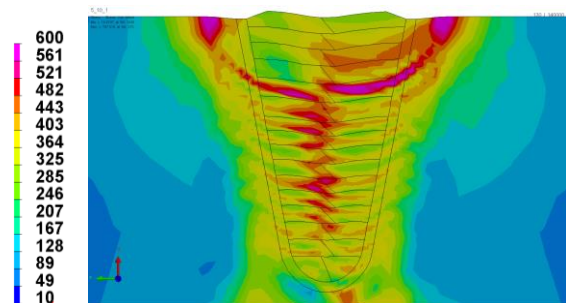
Obr.12 Výpočtový model



Obr.13 Podíl martenzické struktury

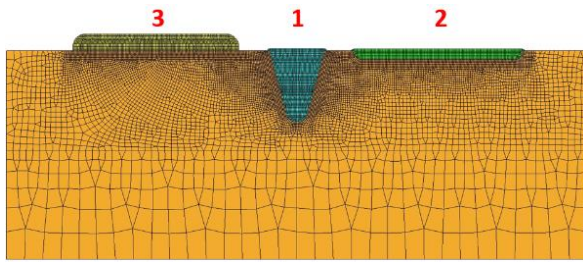


Obr.14 Tvrdosti v jednotkách HV

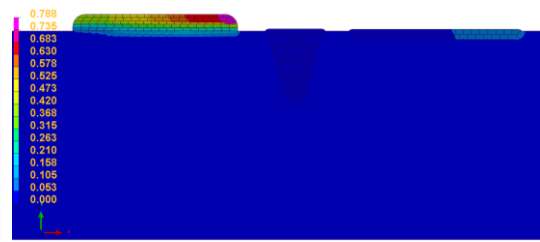


Obr.15 Zbytkové redukované napětí

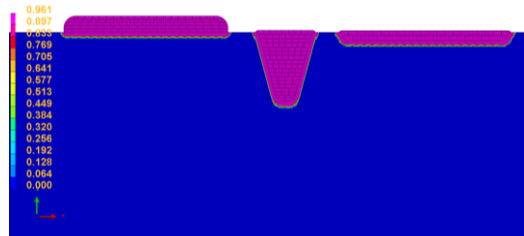




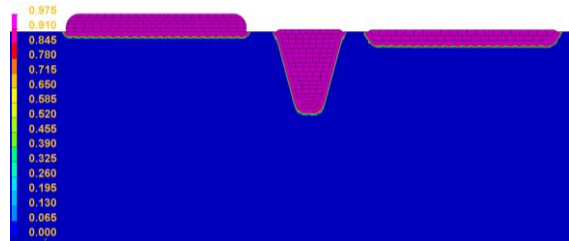
Obr.16 Výpočetní model



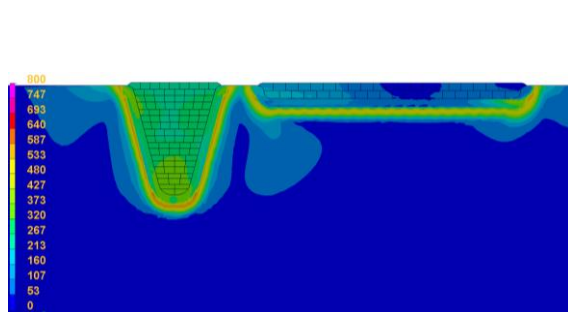
Obr.17 Množství martenzitu pro variantu 1



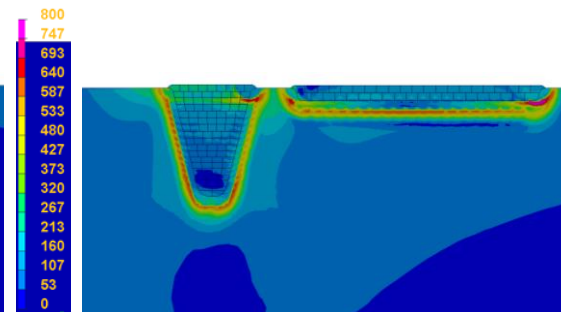
Obr.18 Množství martenzitu pro variantu 2



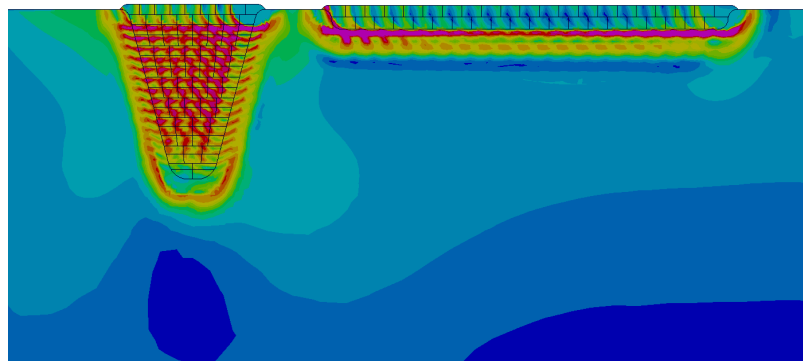
Obr.19 Množství martenzitu pro variantu 3



Obr.20 Zbytkové napětí pro variantu 1



Obr.21 Zbytkové napětí pro variantu 2



Obr.22 Zbytkové napětí pro variantu 3

