



## **KOROZIVZDORNÉ OCELOVÉ PÁSY AUSTENITICKÉHO TYPU PRO VÝROBU ODPORNÍKŮ**

Václav Machek, Jaromír Sodomka\*

Korozivzdorné ocelové odporové pásy jsou nezastupitelným materiálem pro výrobu odporníků používaných především v kolejových elektrických vozidlech, konkrétně v lokomotivách a tramvajích. Používají se ale také jako topné články pro vytápění. Úkolem odporníků v elektrických vozidlech je akumulování energie pohybujícího se vozidla při brždění, která se z energie kinetické přeměňuje na tepelnou. Tato přeměna bývá v určitých případech velice intenzivní, tak jak se to vyskytuje např. při použití rychlobrzdy nebo dlouhodobém brždění vozidla na dlouhém klesání. Odporníky se tak cyklicky zahřívají a ochlazují z teploty okolí až na 700 °C, při čemž jejich životnost se vyžaduje stejná, jako je životnost kolejového vozidla, což je několik desítek let.

Vlastní odporníky jsou meandrovitě nebo spirálovitě složené z pásů různých tloušťek a šířek – obr.2. Vyrábějí se z vysokolegované oceli obsahující chróm a nikl nebo chróm a hliník o nízkém obsahu uhlíku. Pro intenzivní ochlazování těchto odporníků se v provozu používají mohutné ventilátory o výkonu několika m.s<sup>-1</sup>.

Výroba hotových odporníků vyžaduje sladit mnoho speciálních technologií, zejména z oboru tváření a svařování. Vstupním materiálem jsou pásy dodávané hutními podniky. U těchto pásů jsou kladeny speciální požadavky na fyzikální, mechanické i chemické vlastnosti jako jsou korozivzdornost, žáruvzdornost, tvařitelnost, svařitelnost, určitá teplotní roztažnost a celkový elektrický odpor. Kromě toho pak samotné pásy musejí vykazovat maximální rovinnost a izotropii mechanických a fyzikálních vlastností. Následující příspěvek se bude týkat výrobou těchto pásů.

Výroba pásů zastudena válcovaných z odporových korozivzdorných ocelí začala v České republice v 80. letech minulého století ve spolupráci POLDI Kladno a VÚHŽ Dobruška, pracoviště Karlštejn. POLDI Kladno vyráběla ocel a pásovou ocel válcovanou zatepla, kterou VÚHŽ zpracovával na pásy válcováním zastudena. Největšími odběrateli v 80. letech byly ČKD Praha a MEZ Postřelmov. Jednalo se o feritickou korozivzdornou ocel POLDI ALUTERM o jmenovitém chemickém složení 25 % Cr + 5 % Al, jejíž jmenovitá rezistivita byla 1,42 Ωm/mm<sup>2</sup>. Rozhodujícím parametrem kromě korozivzdornosti byly hodnoty celkového odporu, který musel být dodržován v toleranci +/- (5 až 7) % od požadované hodnoty. Výroba této oceli zcela nahradila tehdejší dovoz od švédské firmy Kanthal.

---

\* Ing. Václav Machek, CSc., Ing. Jaromír Sodomka, CSc., Fakulta dopravní ČVUT, Katedra mechaniky a materiálů, Na Florenci 25, 110 00 Praha 1, e-mail: {machek, sodomka}@fd.cvut.cz

Postupem doby byla vyvinuta další pásová odporová korozivzdorná ocel feritického typu POLDI ALKRAL o jmenovitém chemickém složení 15 % Cr + 4 % Al a rezistivitě 1,25  $\Omega\text{m/mm}^2$ . Odběratelem této oceli se stal především MEZ Postřelmov. Austenitické korozivzdorné pásy pro odporníky nebyly v té době žádány.

Koncem 90 let získal MEP Postřelmov jako pokračovatel bývalého MEZ Postřelmov dlouhodobé zakázky do zahraničí na výrobu odporníků pro lokomotivy, které musely být vyrobeny rovněž z korozivzdorných odporových, ale tentokrát austenitických pásových ocelí o rezistivitách 0,85, 0,95 a 1,08  $\Omega\text{m/mm}^2$ . Těmto požadavkům vyhovují oceli W.Nr. 1.4841, 1.4845 a 1.4862 vyráběné jen v několika málo zahraničních firmách. Nejbližší a jediná jakost oceli 17 255 dle ČSN, která by mohla přicházet v úvahu není použitelná, protože nezaručuje potřebnou rezistivitu, přestože se chemickým složením prvním dvou uvedeným ocelím značně podobá. Navíc přesnost výsledného elektrického odporu pásů byla zpřísněna na  $\pm 3\%$  od jmenovité hodnoty. Tyto pásové oceli je možno označit jako odporové pásové oceli nové generace.

Požadavek na vyhovující odporové pásy z austenitických ocelí musel být tedy řešen znovu od výroby oceli až po konečné odválcování zastudena a tepelné zpracování.

Z oblasti válcování zde projevil hned z počátku rozdíl mezi válcováním feritických ocelí a austenitických ocelí v tom, že tranzitní teploty těchto ocelí se zásadně liší. Zatímco u feritických ocelí tranzitní teploty se pohybují okolo  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , austenitické oceli mají tyto teploty hluboko pod bodem mrazu a není tedy nutné s touto teplotou při tváření zastudena počítat. Válcování pásů se pak příliš neodlišuje od válcování běžných austenitických ocelí. Je zde však kladen daleko větší důraz na rovinnost pásů, což na první pohled není obtížné zajistit, ve skutečnosti však tento problém je výrazný a je ho nutno řešit úpravou válcovacích úběrů v kombinaci s mezioperačním a finálním žiháním.

Dalším velkým problémem, který trvá dosud, je zajištění izotropie mechanických a fyzikálních vlastností v ploše pásů. Zajištění izotropie je nutno řešit vhodnou kombinací úběrových plánů a austenitizačního žihání. Důsledkem anizotropie jsou pak problémy při lisování do konečných tvarů u výrobce odporníků a při vlastním provozu.

Ze všech požadovaných fyzikálních vlastností, která nejvíce komplikuje výrobu, je zajištění výsledného celkového elektrického odporu dodaného pásu. Ten je jednak dán chemickým složením oceli, jednak průřezem pásu. Odběratelé pásů požadují zaručování elektrických odporů v toleranci  $\pm 3\%$  od jmenovité hodnoty, což je tolerance, kterou zaručují všechny zahraniční renomované firmy. Těch však není mnoho. Vzhledem k tomu, že tyto zahraniční firmy vyrábějí odporové pásy ve velkých množstvích a vzhledem k jejich mnohaletým zkušenostem a výrobnímu i laboratornímu vybavení, není zaručování těchto vlastností pro ně dnes již asi velkým problémem. U nás však, kde se s výrobou v podstatě začíná, se tento problém řešil velice obtížně. Byla však vyvinuta velmi jednoduchá metoda doladování konečného odporu změnou konečné tloušťky. Tato metoda se velmi osvědčila zvláště tehdy, jsou-li požadovány dodávky malých množství a různých jakostí pásů, kdy hodnoty chemického složení jednotlivých vstupních jakostí značně kolísají a tudíž se mění i jejich rezistivita.

K řešení problému byla využita známá rovnice výpočtu odporu

$$R = \rho \cdot L / S = \rho \cdot L / a \cdot b \quad (1)$$

kde:

R	$\Omega$	celkový odpor pásu
$\rho$	$\Omega \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	rezistivita oceli
S	$\text{mm}^2$	průřez pásu
a,b	mm	tloušťka a šířka pásu

Pro délku 1 metru se tato rovnice zjednoduší na :

$$R = \rho / a \cdot b \quad (2)$$

Jestliže je známá hodnota rezistivity konkrétní tavby a požadovaná hodnota celkového odporu finálního rozměru pásu, záleží pak jen na průřezu pásu, jaký výsledný odpor pás bude mít. A protože je současně dána i šířka pásu ve značně přesných tolerancích, zůstává pak jedinou proměnnou tloušťka, kterou však je možno technologicky dobře ovládat.

Z rovnice (2) plyne:

$$a = \rho_{sk} / R_t \cdot b \quad (3)$$

kde	$R_t = \rho / a \cdot b$	požadovaný odpor v $\Omega$
	$\rho_{sk}$	skutečná rezistivita dané tavby v $\Omega \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
	a	finální tloušťka pásu v mm
	b	finální šířka pásu v mm

Ze vztahu (3) lze určit teoretickou toleranci tloušťky a následně pak i celkový elektrický odpor. Obě dvě veličiny se musí pohybovat v rozmezí +/- 3% od tloušťky vypočtené, popř. jmenovité.

Teoreticky vypočtenou toleranci tloušťky je však při výrobě značně obtížné dodržet. Protože požadované tloušťky jsou až 0,40 mm, je nutno mít na zřeteli, že tolerance +/- 3 % celkového elektrického odporu znamenalo vyrobit pás o tloušťce 0,40 mm s tolerancí +/- 0,012 mm. To však nestačí, protože je nutné počítat s tím, že i chemické složení v průběhu pásu bude mít určitý rozptyl, který způsobí změnu rezistivity. Jestliže si stanovíme krajní hranici kolísání rezistivity v důsledku kolísání chemického složení jen 1 %, zbývá na kolísání tolerance šířky už jen +/- 2 %, což při tloušťce 0,40 mm činí již jen +/- 0,008 mm a to je již značně náročné na vlastní výrobu pásů. Je samozřejmé, že při větších tloušťkách se tyto tolerance v absolutních hodnotách zvyšují, takže při 1 mm je již požadavek na toleranci tloušťky +/- 0,02 mm. Ale i tyto hodnoty tolerance tloušťky souběžně s požadavky na maximální rovinnost pásu jsou vysoce náročné jak na kvalitu válcovací stolice, tak na zdatnost obsluhy této válcovací stolice.

Již zmíněná rovinnost pásů je dalším a nutno zde přiznat ne ještě zcela zvládnutým, problémem výroby pásů. Tento problém se řeší z nedostatku času a hlavně finančních prostředků tzv. při pochodu, kdy se zkouší různé varianty technologických postupů. V současnosti se řeší rovinnost technologickou operací rovnáním na tahohybové rovnačce. Tento způsob se ale zřejmě nestane konečným řešením, protože pnutí vnesená do pásů v průběhu rovnání se při ohřevu na pracovní teploty opět uvolňují a z nich vyrobené výlisky se tím částečně deformují a způsobují v odpornících nepřípustné elektrické zkraty. Řešení se částečně našlo u výrobce odporníků ve zvýšení konstrukční tuhosti výlisků a snížení šířky

pásů. Bude ale nutné do budoucnosti zajišťovat potřebnou rovinnost změnou technologie. Ta bude spočívat v zavedení speciálních hladících úběrů na válcovací stoličce nebo v rovnání na klasických víceválečkových rovnačkách. To vyřeší i současný problém, který vzniká při tahohybovém rovnání, kdy není zcela ovladatelná změna průřezu pásu při určitém prodloužení a s tím spojená i změna elektrického odporu.

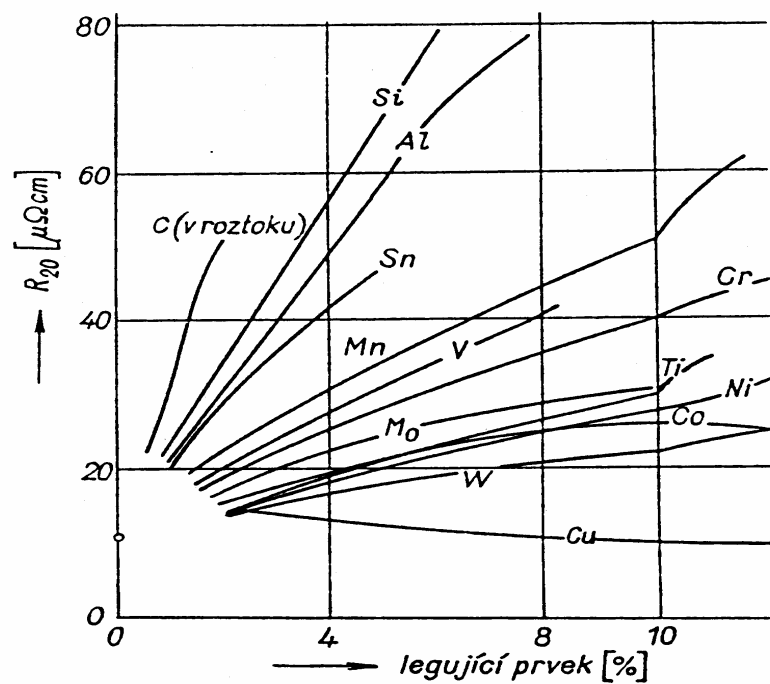
Vliv chemického složení je pro zajištění rezistivity rozhodující. Pokud se vstupní materiál objednává od renomovaného výrobce, ten požadovanou rezistivitu v poměrně úzkých tolerancích zaručuje. Doladění se pak provádí výše uvedeným způsobem. Určité oceli, zvláště pak ty nejvýše legované, však zahraniční firmy mnohdy odmítají dodávat jako vstupní surovinu a je nutno je tedy vyrábět od vytavení v tuzemsku. Pak je nutno chemické složení stanovovat na základě vlastního rozhodnutí a znalosti vlivu prvků na odpor. Přitom je nutno mít na zřeteli, že se musí zajistit potřebná svařitelnost pásů.

Vliv jednotlivých prvků na odpor je uveden na obr.1. Z něho vyplývá, že největší vliv na rezistivitu má z technicky použitelných prvků křemík. Vliv chromu a niklu na rezistivitu je už menší a jejich obsah je také závislý na zaručení potřebné korozivzdornosti a žáruvzdornosti oceli. Křemík však zase od určitého obsahu negativně působí na svařitelnost a částečně i na tvařitelnost zastudena. Není proto možné za účelem zvýšení rezistivity jeho množství v oceli zvyšovat libovolně. Kromě toho ocel musí mít chemické složení v rozmezí odpovídajícímu příslušné normě oceli.

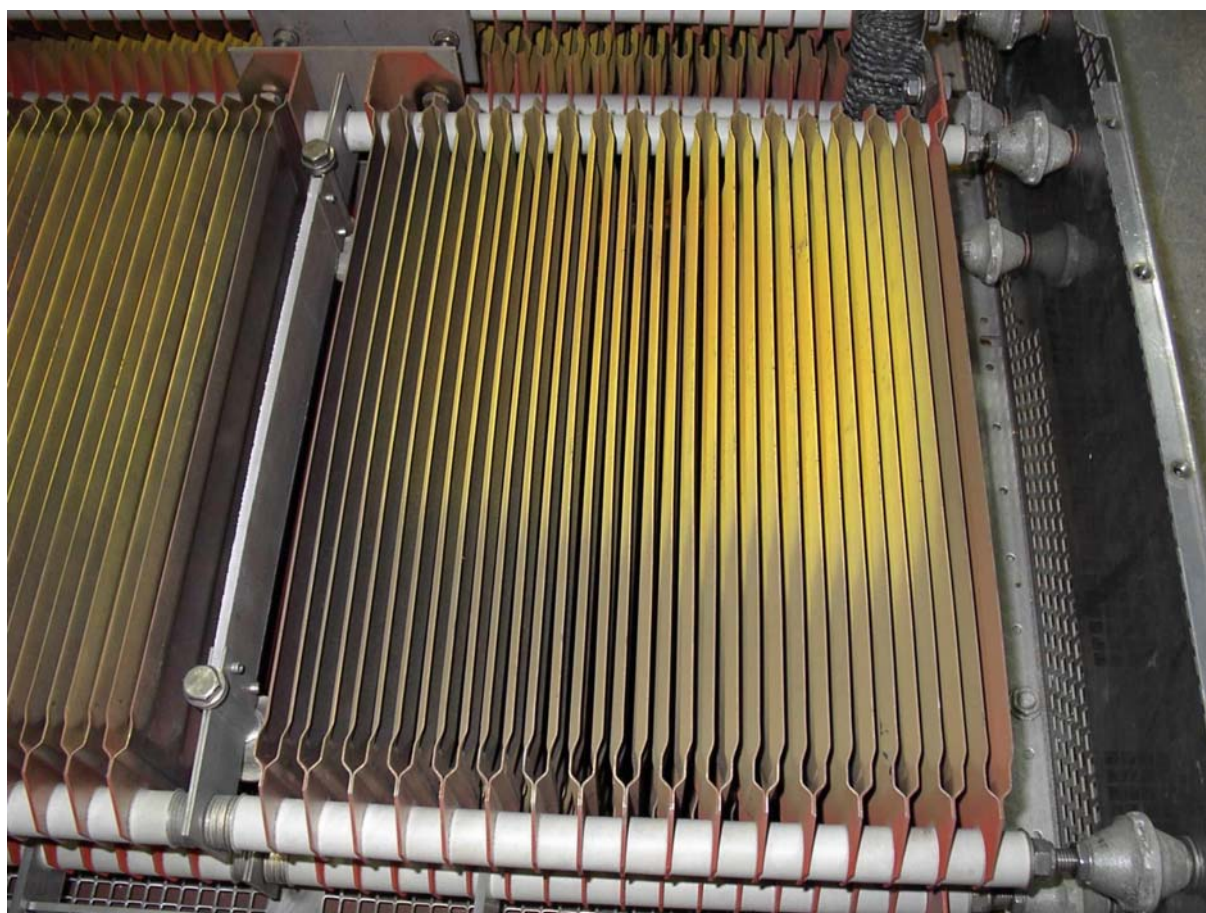
Většina pásů je dnes stále ještě dodávána jako zkušební množství, neboť prostudování vlastností a výrobní technologie se provádí nárazově a jen v tom nejmenším rozsahu, jehož důsledkem jsou poměrně vysoké ztráty materiálu při výrobě. Celá situace je způsobena nedostatkem finančních prostředků na výzkum, kterých velké zahraniční firmy mají dostatek. Protože však dodávky zahraničních firem jsou podmiňovány odebráním velkých množství, což je finančně pro MEP Postřelmov neúnosné a navíc v dlouhých časových lhůtách, potřebuje MEP Postřelmov spolehlivého dodavatele pásů, který by operativně dodával malá množství požadovaných rozměrů v co nejkratší době, konkrétně během několika málo týdnů, což je čtyř až šestinásobně rychleji než nabízejí zahraniční dodavatelé.

Přes všechny uvedené problémy se podařilo za poslední dva roky vyrobit v našich hutích desítky tun pásů z korozivzdorných odporových ocelí, které byly zabudovány do odporníků a většinou exportovány do západních i východních zemí Evropy i na americký kontinent.

Výzkumné práce budou pokračovat na katedře mechaniky a materiálů FD ve spolupráci s Válcovnou speciálních materiálů Panenské Břežan a MEP Postřelmov. Vzhledem k tomu, že nebyla dosud Ministerstvem průmyslu a obchodu uvedené válcovně přiznána žádaná finanční podpora, nebudou se moci některé finančně náročnější výzkumné práce uskutečnit, ale základní poznatky se předpokládají utřídit tak, aby postupně docházelo ke stálému zkvalitňování úrovně dodávaných odporových pásů.



Obr. 1 Vliv prvků na zvyšování rezistivity železa



Obr. 2 Odporník do elektrické lokomotivy