VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | FAKULTA STROJNÍ | KATEDRA MECHANICKÉ TECHNOLOGIE

Konference „Zpracování plechu“

ČSVZP a Technická Univerzita Liberec

dne 10.září 2020

Aplikace metody DRECE (Dual Rolls Equal Channel Extrusion) při zušlechťování nízkouhlíkových ocelí

Autoři : R. Zabystrzan, S. Rusz, **Vl. Ochodek**,
P. Szkandera O. Hilšer, J. Švec, M. Pastrňák

STEELTEC CZ, s. r. o.,Třinec
VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní

Název projektu:

„Vývoj nové technologie zušlechťování ocelových pásů“

Ev. č.: TH04010416

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Epsilon.

Úvod

Jednou ze známých metod zvýšení užitných vlastností konvenčních materiálů na bázi ocelí a slitin neželezných kovů je tváření v podmínkách vícenásobné plastické deformace (SPD), kdy vlivem tvářecího procesu dochází ke snížení průměrné velikosti zrna a dle známého Hall-Petchova vztahu teoreticky existuje lineární závislost mezi průměrnou velikostí zrna a mezí kluzu polykrystalických materiálů. Na základě daného principu byla vyvinuta řada metod zvyšování užitných vlastností daných materiálů.

Metody SPD (Cyclic Severe Plastic Deformation - intenzivní plastická deformace)

- Protlačování pravoúhlým rovnostranným kanálem (Equal-Channel Angular Pressing ECAP),
- Dissimilar Channel Angular Pressing (DCAP),
- Metoda kumulativního válcování (Accumulative Roll Bonding - ARB),
- Rovnoměrné úhlové vytlačování kanálem (Equal Channel Angular Rolling-ECAR),
- Daul Rolls Equal Channel Extrusion (DRECE),
- Extruzinní protlačování (CONFORM).

Nejčastěji používané metody SPD (Severe Plastic Deformation - intenzivní plastická deformace)

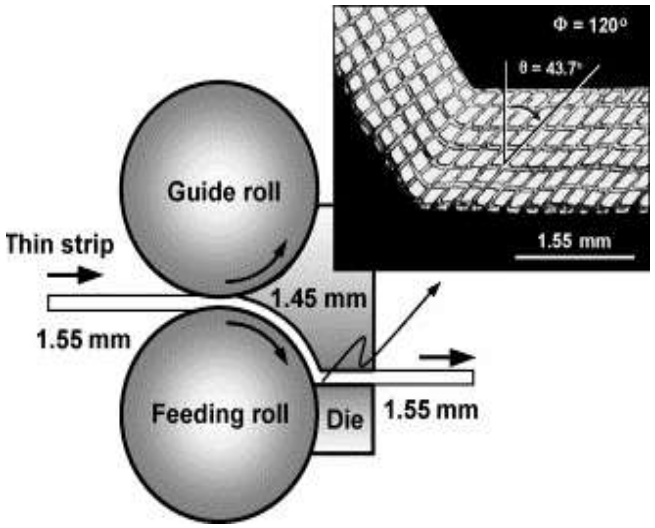


Schéma metody DCAP

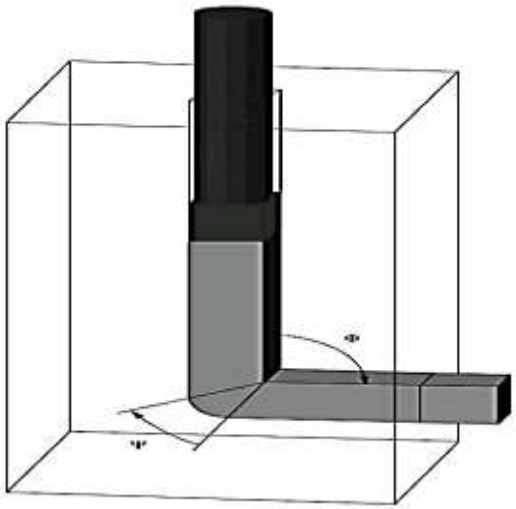


Schéma metody ECAP

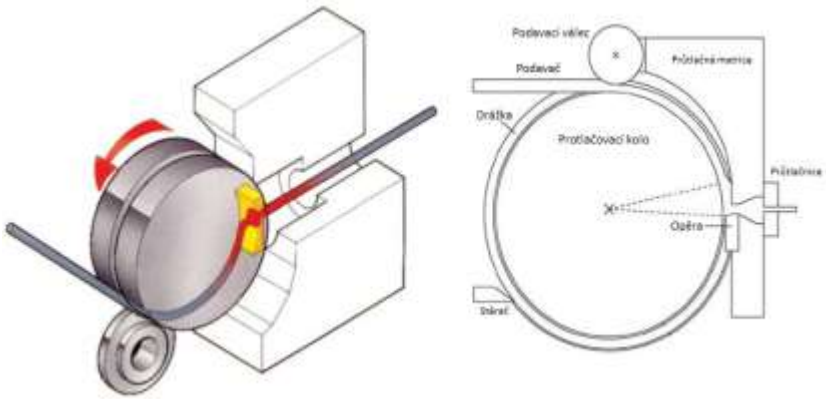


Schéma metody CONFORM

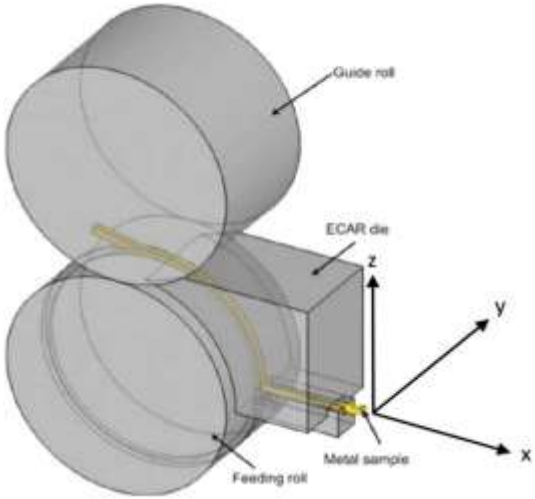


Schéma metody ECAR

Tvářecí zařízení využívající princip SPD-VŠB TUO

- Prototyp tvářecí zařízení byl vyvinut na VŠB – TU Ostrava v létech 2010 – 2014. Dané zařízení využívá princip SPD (vícenásobná plastická deformace), jako jednu z moderních metod pro zvyšování jakosti kovových materiálů.
- Podstatou procesu SPD je **neměnnost rozměrů polotovaru před a po průchodů tvářecím zařízením**, čímž se odlišuje od ostatních tvářecích metod.
- Konstrukční řešení tvářecího zařízení pro protlačování pásu plechu je zcela unikátní z hlediska dosažení potřebné protlačovací síly a velmi přesnému vymezení zóny deformace.
- Je možno protlačovat ocelí, neželezné kovy a jejich slitiny za studena.
- Možnost indukčního předehřevu na vstupní části tvářecího zařízení.
- Tvářecí zařízení je určeno pro protlačování pásu plechu o rozměrech 58 mm (šířka) x 2 mm (tloušťka) x 1 500 mm (délka), může být přizpůsobeno odvíjení ze svitku plechu.

Popis funkce

- Tvářecí zařízení je složeno z těchto hlavních částí: převodovka typu Nord, elektromotor s frekvenčním měničem rychlosti, lamelová spojka, podávací válec a přítlačné válce s regulací přítlačné síly, vlastní tvářecí nástroj z oceli typu Dievar.
- Do zařízení se vkládá pás plechu o rozměrech 58x2x1500 mm (šířka x tloušťka x délka).
- Za pomoci hlavního a vodícího válce a v součinnosti s přítlačným válcem je pás protlačován tvářecím nástrojem. Při procesu nedochází ke změně příčného průřezu. Při takto prováděné vícenásobné plastické deformaci docílíme podstatného zvýšení jakosti polotovaru (mechanických vlastností, především meze kluzu Re, při zachování tvářitelnosti).
- V první fázi je vymezen přítlak hydraulických válců pro zajištění potřebné třecí síly na podávacím válci, následně jsou nastaveny otáčky elektromotoru pomocí frekvenčního měniče. Podle jejich výše se stanoví obvodová rychlost podávacího válce a tímto i rychlost protlačovaného pásu plechu.
- Rozsah rychlosti, které dosahuje pás je v rozmezí 1-10 mm . s^{-1} .

Tvářené materiály, konstrukční úpravy

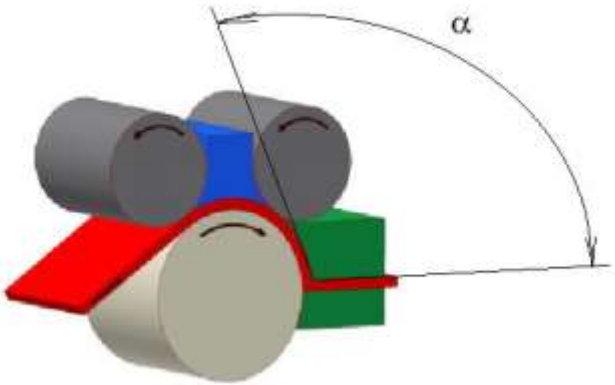
- Pás plechu je vložen ze zadní strany do nástroje, je spuštěno regulovatelné mazání a proveden vlastní tvářecí proces. Podle potřeby je prováděno několik průchodů tvářecím zařízením. Po jednotlivých průchodech je měřena tloušťka a šířka pásu plechu. Dále jsou vyhodnocovány dosažené mechanické a tvářecí parametry a proveden metalografický rozbor. Kontrola kvality povrchu je prováděna vizuálně.
- Experimenty byly prováděny s těmito materiály: Al 99,5 %, Cu 99,5%, mosaz, nízkouhlíkové oceli DC01, DC03, Ck55, S235, S355, HC 200AM a dalších.
- Bylo dosaženo značného zvýšení meze kluzu Re i zachování potřebné velikosti plasticity pro finální tvářecí operaci, což jsou velmi zajímavé výsledky i pro průmyslovou praxi. Postačilo by zabudovat jedno tvářecí zařízení do výrobní linky a významně tak uspořit materiálové náklady.
- Ověřujeme svařování protlačených oceli z hlediska měření zbytkového pnutí a jeho vlivu na dosažené mechanické vlastnosti.
- Provádíme přípravu konstrukčního návrhu tvářecích nástrojů pro max. šířku plechu 250 mm, tloušťku od 1 – 2,5 mm, max. rychlost podávání pásu plechu – 100 mm . s^{-1} .

Technické parametry tvářecího zařízení

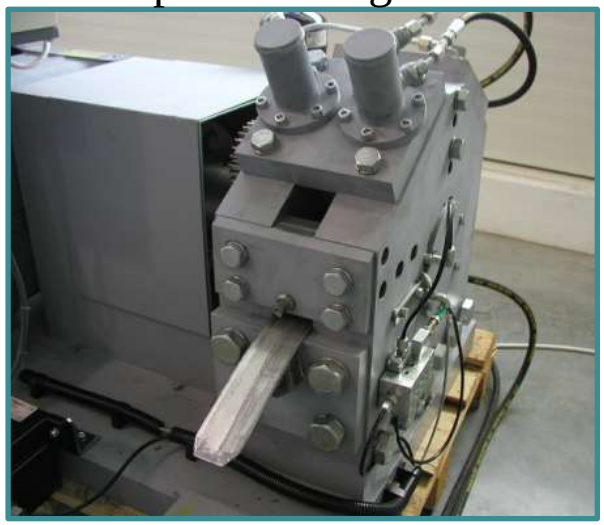
Celkový instalovaný příkon	370 W
Chlazení motoru	cizí
Otáčky motoru	0 - 1500 (3000) rev/min
Převodový poměr	I = 400
Rozsah otáček přepočítaný na pracovní válec	0 - 3,75 (7,5) rev/min
Rozsah momentů přepočítaný na pracovní válec	0 - 50 600 (25 300) Nm
Pracovní tlak v hydraulickém systému	1 - 12 MPa
Rozsah sily přítlačných válců	0 - 45 kN
Max. průtok kapaliny z hydrogenerátoru	0-1,5 dm^3min^{-1}
Pracovní kapalina - minerální olej HLP VG 46	5 dm^3
Filtrace sací a vzduchová	10 μm
Pracovní teplota (rozsah)	5 - 60^0C
Elektrická soustava	400V- 50 Hz
Ovládací napětí	24 V DC
Výkon elektromotoru hydrauliky	0,55 kW
Rychlost elektromotoru hydrauliky	1450 rev/min

Metoda DRECE

Technologie protlačování zalomeným otvorem - DRECE (Dual Rolling Equal Channel Extrusion), α = **108**-118°.



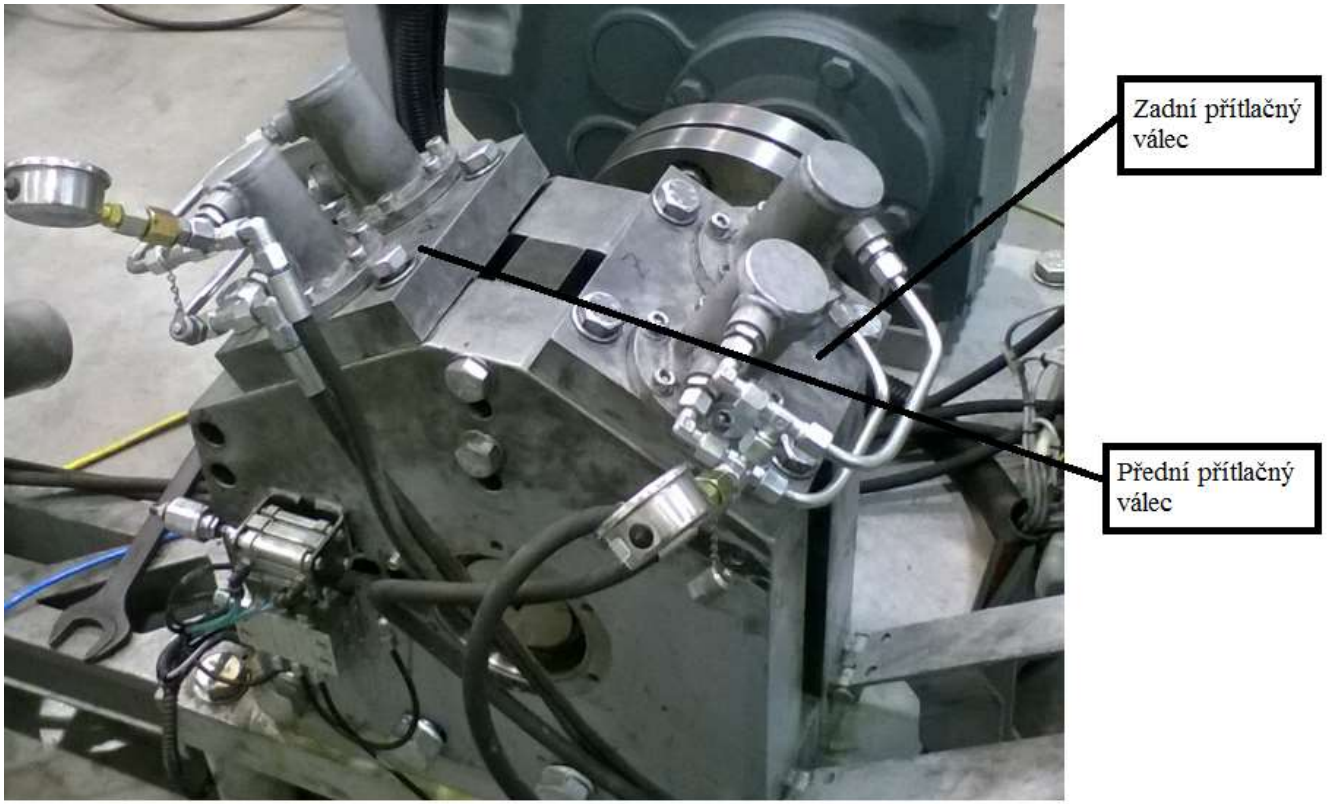
Koncept technologie DRECE



Prototyp tvářecího zařízení DRECE

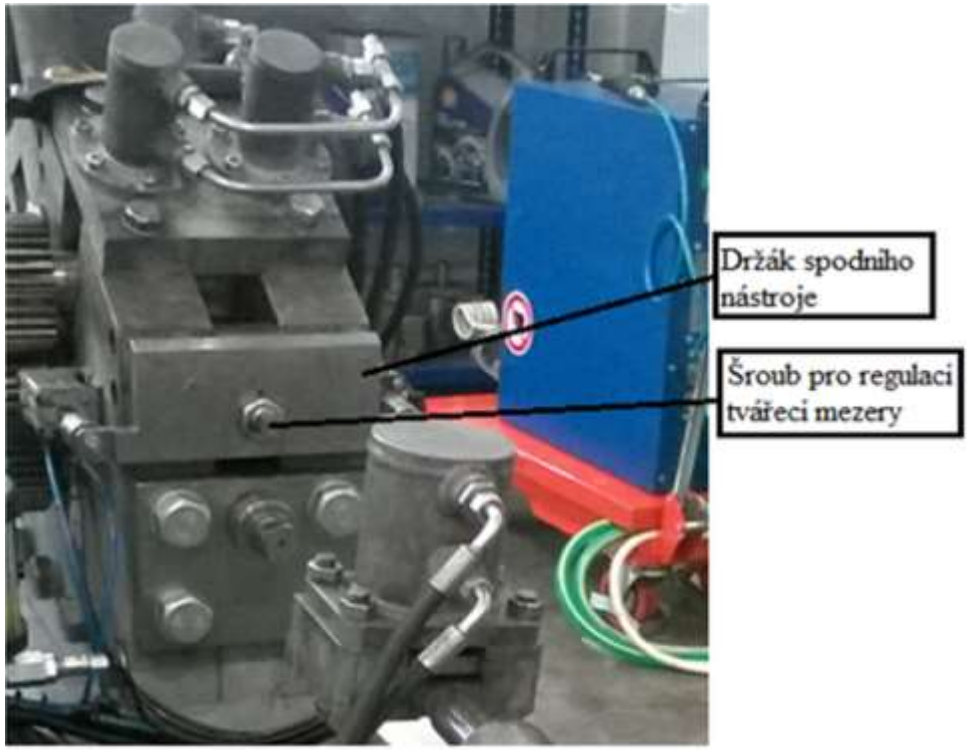
Tvářecí parametry

- Úhel v zóně deformace: 108°,
- Tlaky přítlačných válců: zadní válec 40 MPa, přední válec 200 MPa.

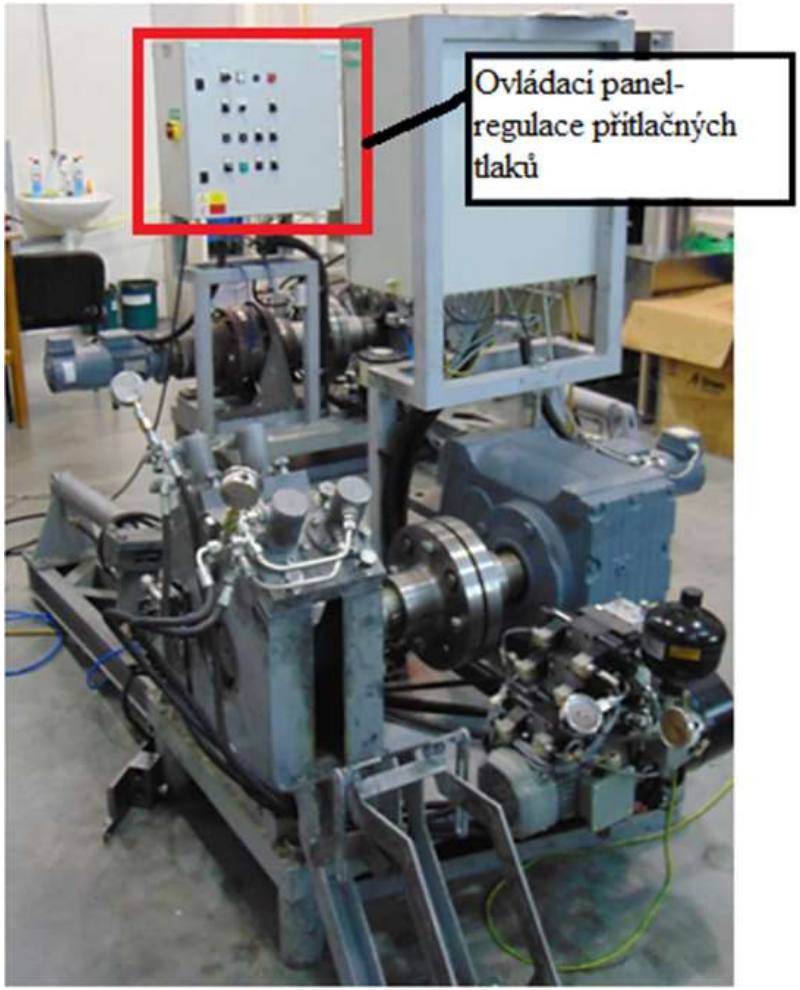


Přítlačné válce tvářecího zařízení

Seřizování mezery mezi nástroji v zóně deformace



Regulace tvářecí mezery



Regulace přítlačných tlaků

Plán experimentů na oceli DC01

- Metoda tváření: **DRECE**
- Úhel nástroje: **108°**
- Počet průchodů: **1, 2, 3, 4, 5, 6 a 7**
- Tvářený materiál: **DC01**
- Ověření vlivu počtu průchodů pásu plechu tvářecím nástrojem z hlediska dosažení požadovaných mechanických i tvářecích parametrů ověřované oceli.
- Zkoumání vlivu anizotropie plechu.
- Analýza procesu SPD z hlediska dosažení požadovaných mechanických vlastností i tvářitelnosti jak rovněž i struktury oceli DC01.
- Analýza zbytkových napětí.

Charakteristika tvářené oceli

Chemické složení oceli DC01

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]
0,050	0,203	0,020	0,014	0,008	0,053	0,056	0,005	0,075
Ti [%]	**Co [%]**	**B [%]**	**Pb [%]**	**V [%]**	**W [%]**	**Al [%]**	**Nb [%]**	
<0,001	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,050	<0,001	

Mechanické vlastnosti oceli DC01

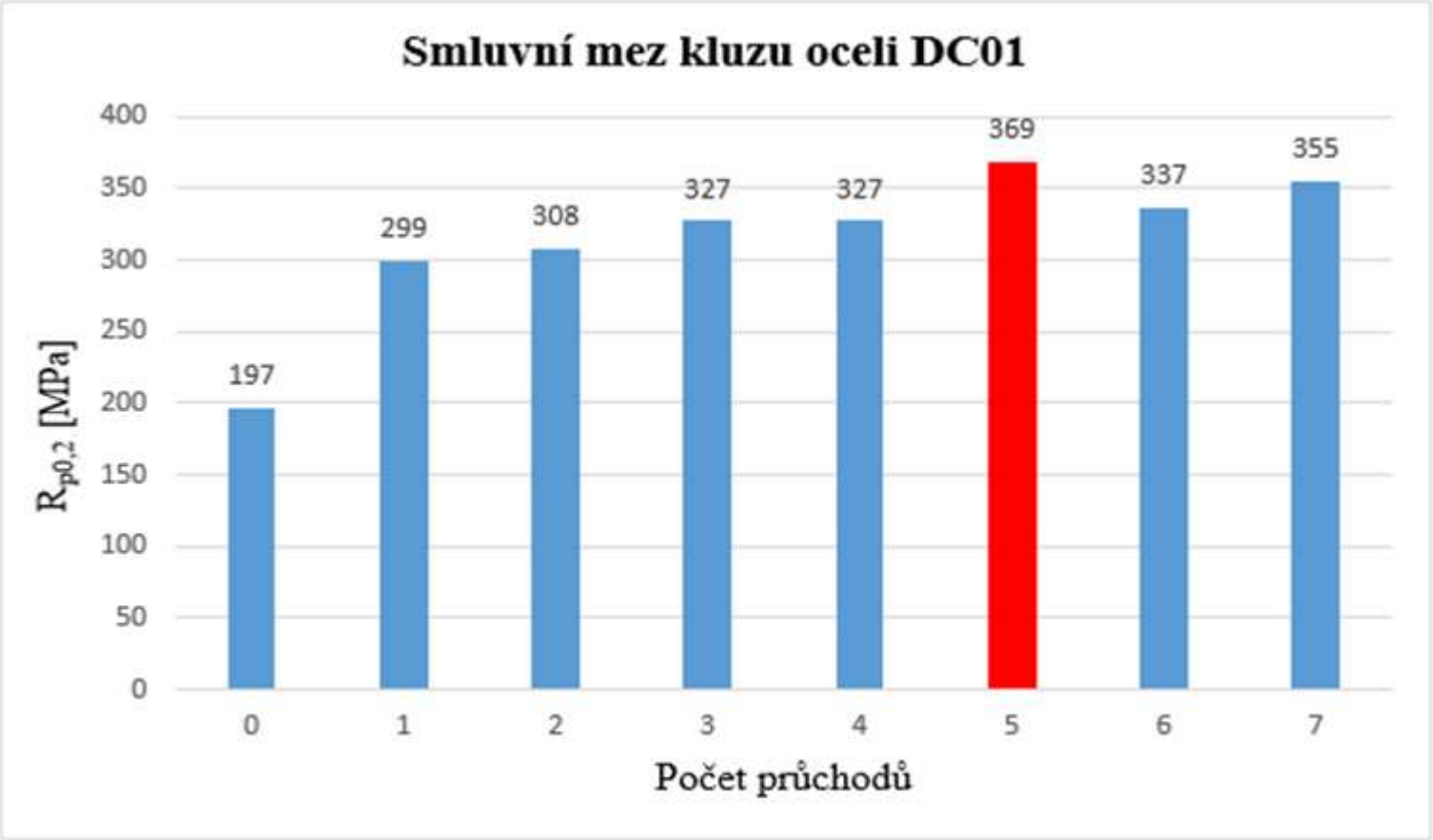
Označení oceli	Mechanické vlastnosti		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
DC01	280	270 - 410	28

Výsledky experimentů

Mechanické vlastnosti - zkouška tahem

	Mechanické vlastnosti				
Počet průchodů	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
0 (VS)	22 300	36 500	197	323	66,0
1	32 000	38 000	299	355	40,5
2	33 000	40 500	308	379	29,5
3	35 000	43 000	327	402	27,0
4	35 000	44 000	327	411	22,9
5	39 500	49 000	369	458	21,9
6	36 000	39 000	337	365	20,5
7	38 000	46 500	355	435	19,4

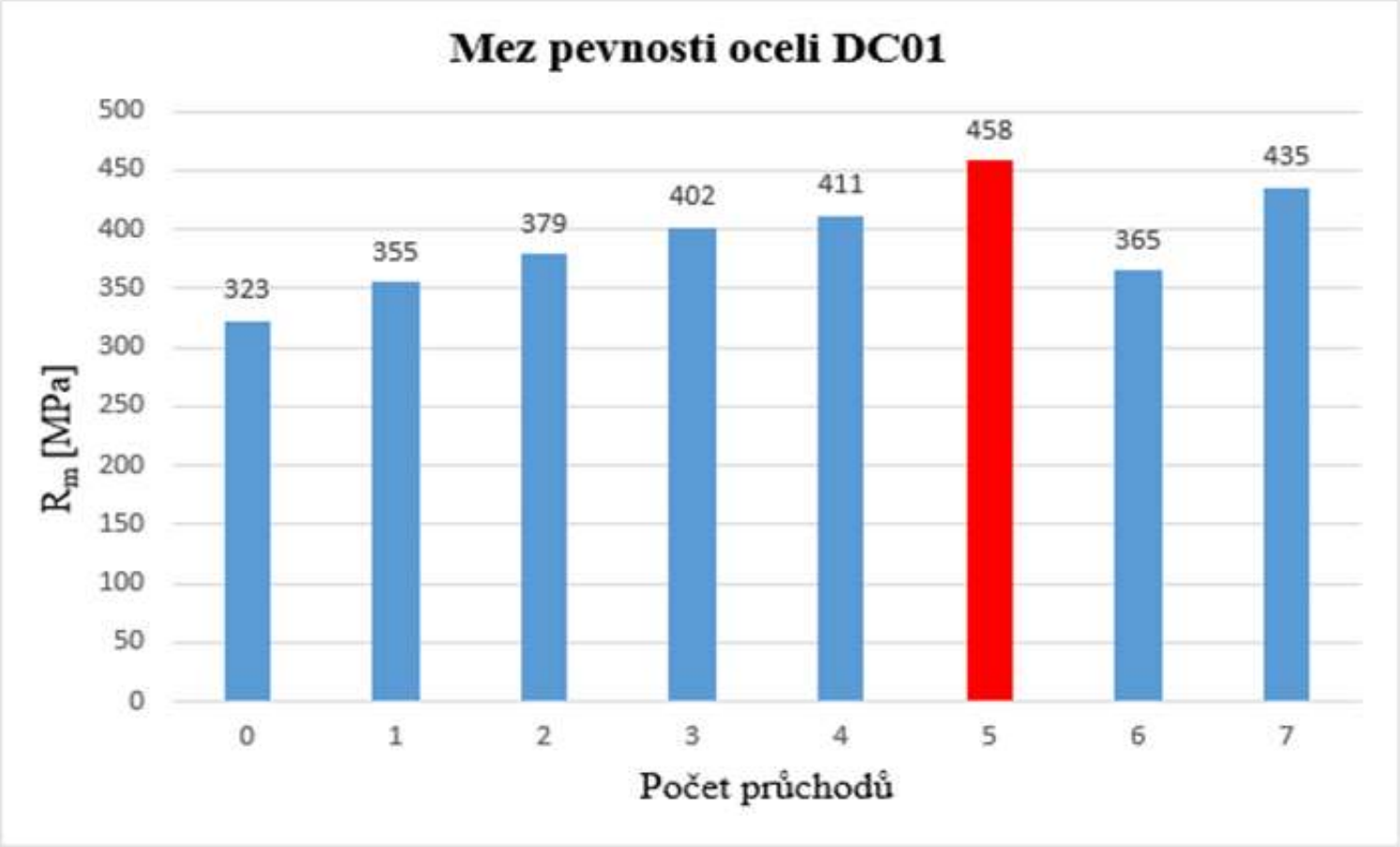
Smluvní mez kluzu



Závislost smluvní meze kluzu oceli DC01 na počtu průchodů

Smluvní mez kluzu ($Rp_{0,2}$) je po 1. průchodu navýšená o 102 MPa (51,8 %) ve srovnání s výchozím stavem oceli.

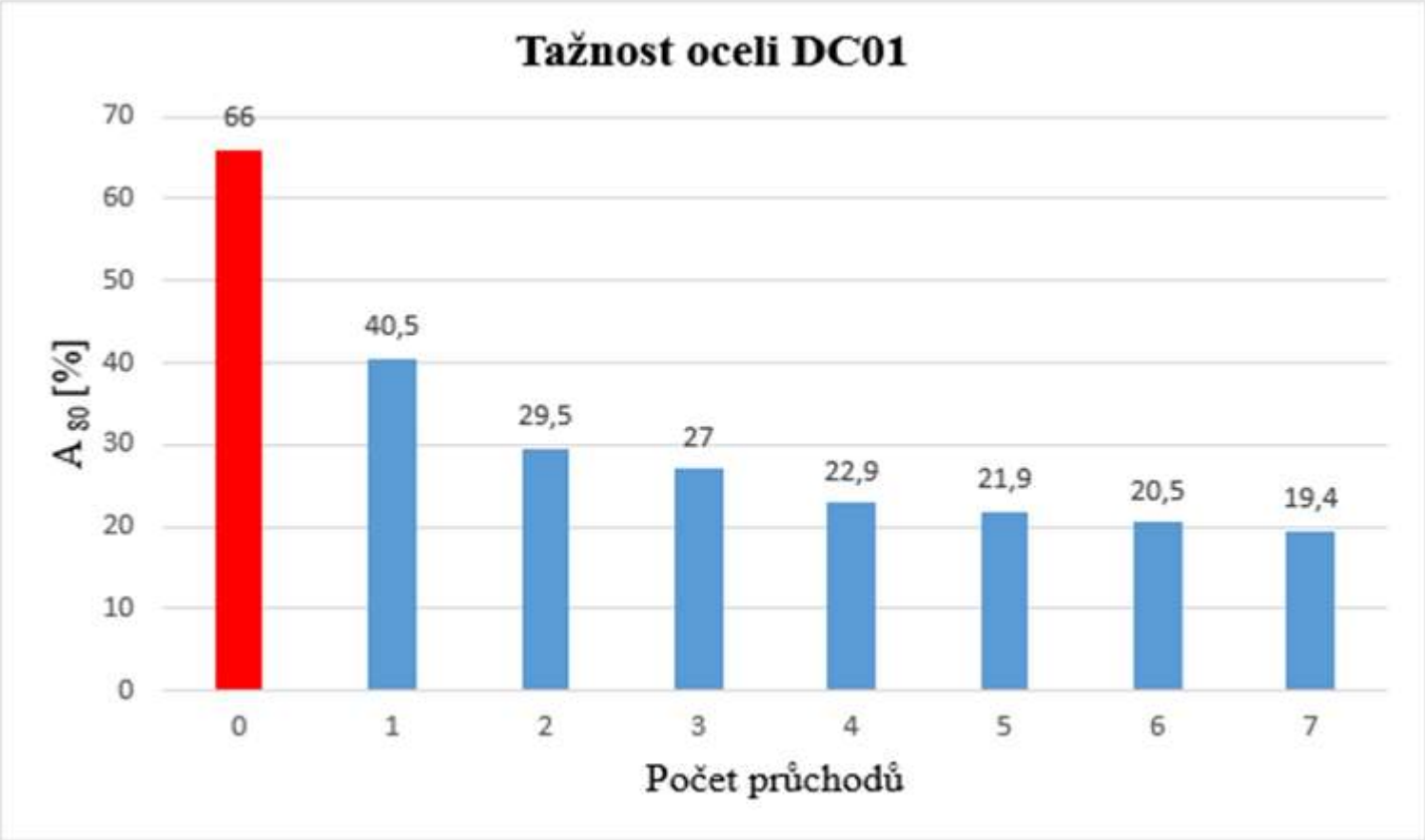
Mez pevnosti



Závislost meze pevnosti oceli DC01 na počtu průchodů

Mez pevnosti (Rm) je po 1. průchodu navýšená o 32 MPa (9,9 %) ve srovnání s výchozím stavem oceli.

Tažnost



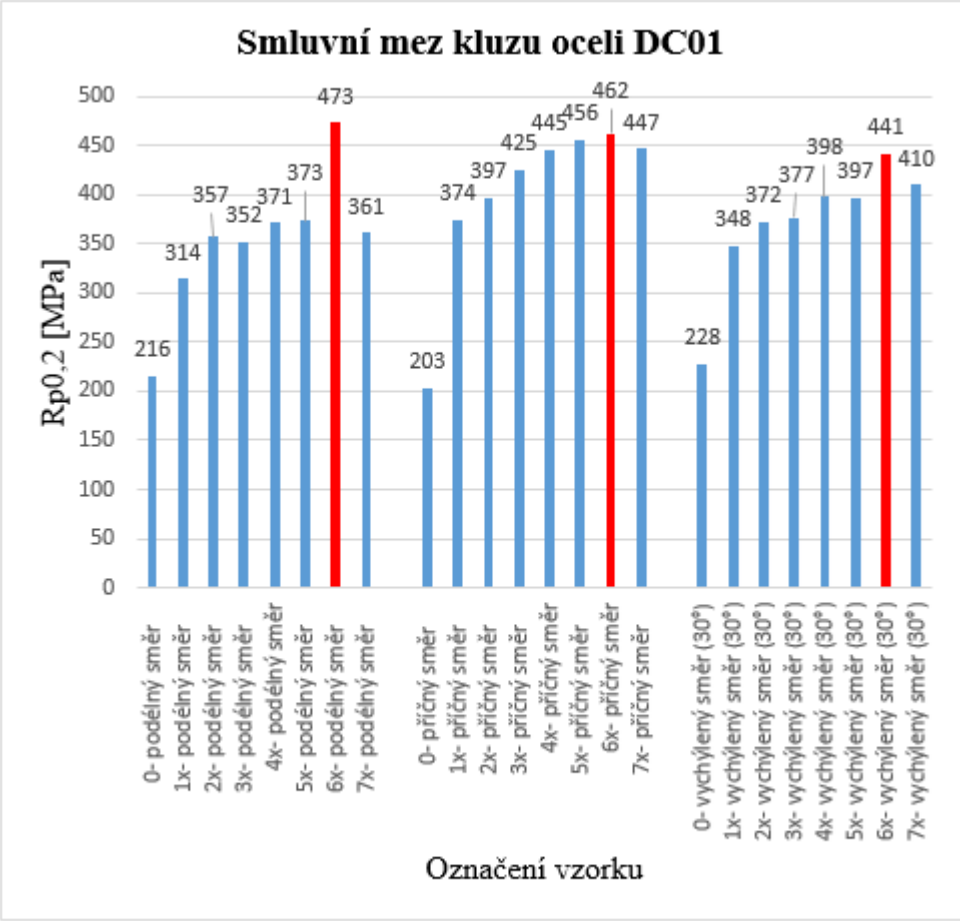
Závislost tažnosti oceli DC01 na počtu průchodů

Tažnost (A80) po 1. průchodu poklesla o 25,5 % ve srovnání s výchozím stavem oceli.

Vliv anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti – smluvní mez kluzu

Porovnání smluvní meze kluzu

Počet průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]		
	Podélný směr	Příčný směr	Vychýlený směr (30°)
0 (VS)	216	203	228
1	314	374	348
Rozdíl $R_{p0,2}$ po 1. průchodu vzhledem k podélnému směru, vyjádřený v %		19,1	10,8

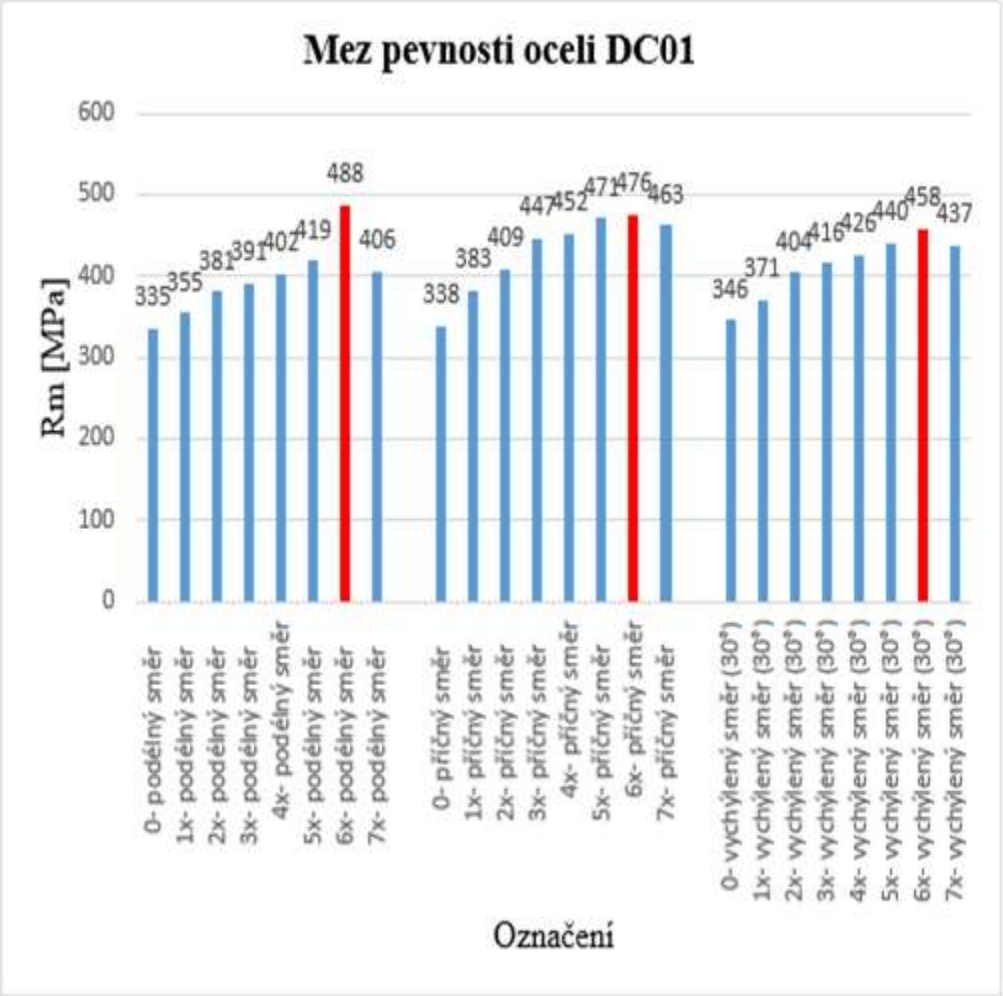


Smluvní mez kluzu oceli DC01

Vliv anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti – mez pevnosti

Porovnání meze pevnosti

Počet průchodů	R_m [MPa]		
	Podélný směr	Příčný směr	Vychýlený směr (30°)
0	335	338	346
1	355	383	371
Rozdíl R_m po 1. průchodu vzhledem k podélnému směru, vyjádřený v %		7,9	4,5

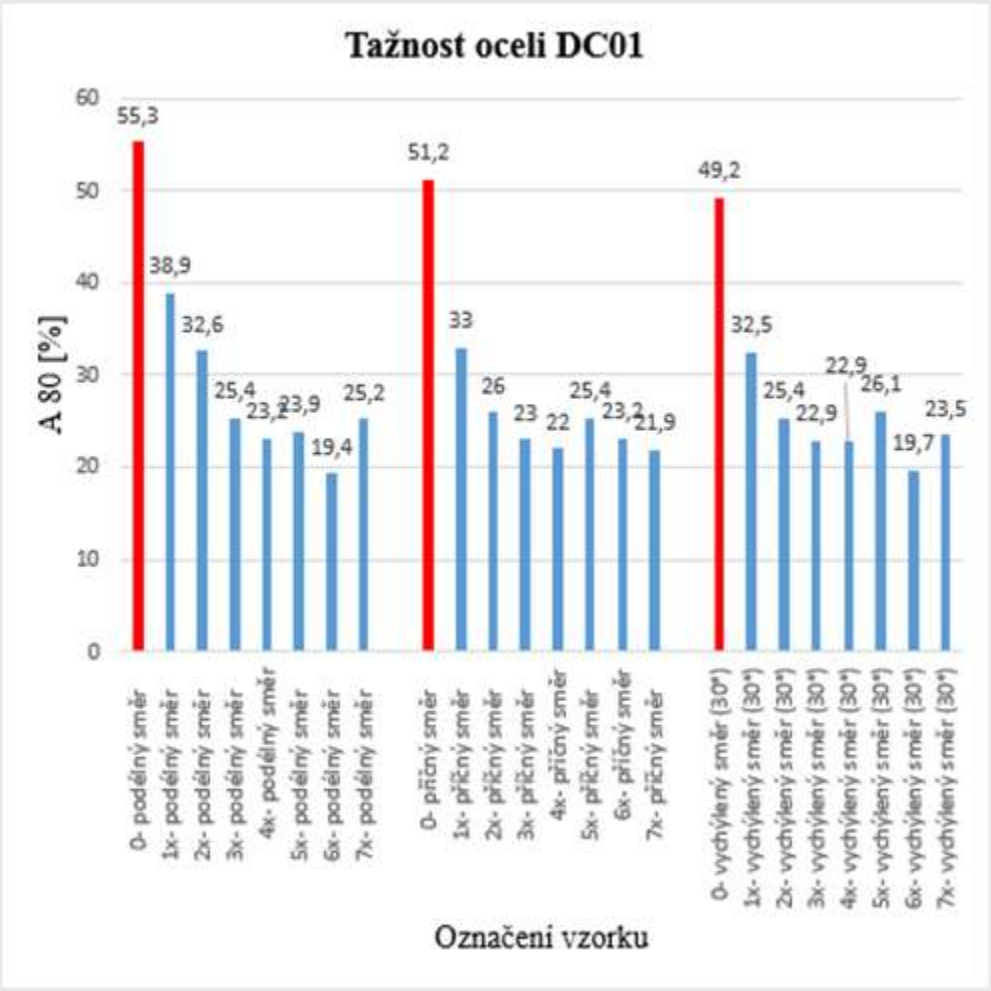


Mez pevnosti v jednotlivých směrech pásu plechu

Vliv anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti – tažnost

Porovnání tažnosti

Počet průchodů	A_{80} [%]		
	Podélný směr	Příčný směr	Vychýlený směr (30°)
0	55,3	51,2	49,2
1	38,9	33	32,5
Rozdíl A_{80} po 1. průchodu vzhledem k podélnému směru, vyjádřený v %		5,9	6,4



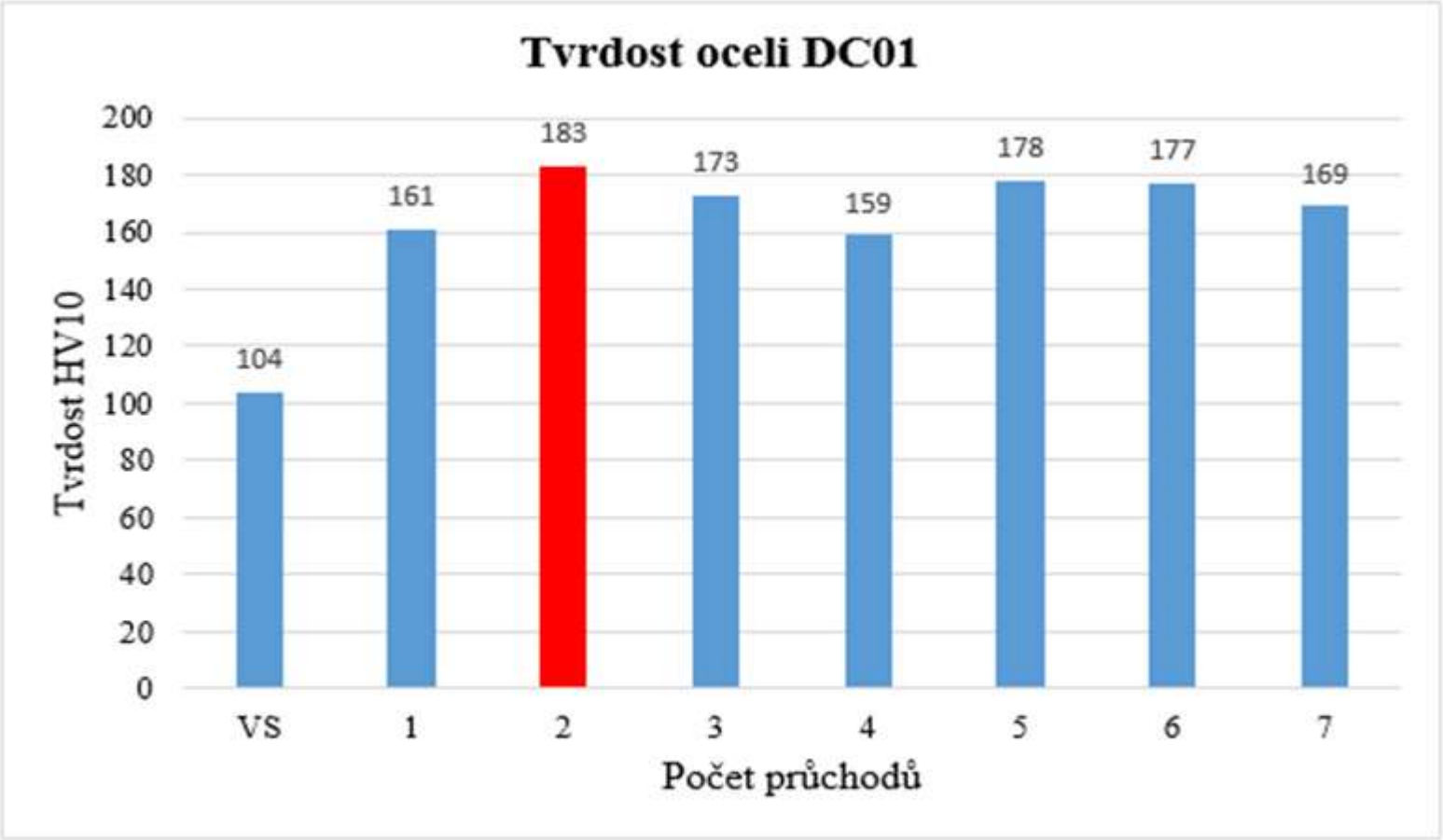
Tažnost v jednotlivých směrech pásu plechu

DC01-tvrdost

Tvrdost oceli DC01

Počet průchodů	HV 10	HV 10	HV 10	Průměrná hodnota HV 10
0 (VS)	104	105	105	104
1	159	157	168	161
2	180	183	187	183
3	173	173	175	173
4	165	158	155	159
5	177	179	177	178
6	179	175	176	177
7	171	168	167	169

DC01-tvrdost



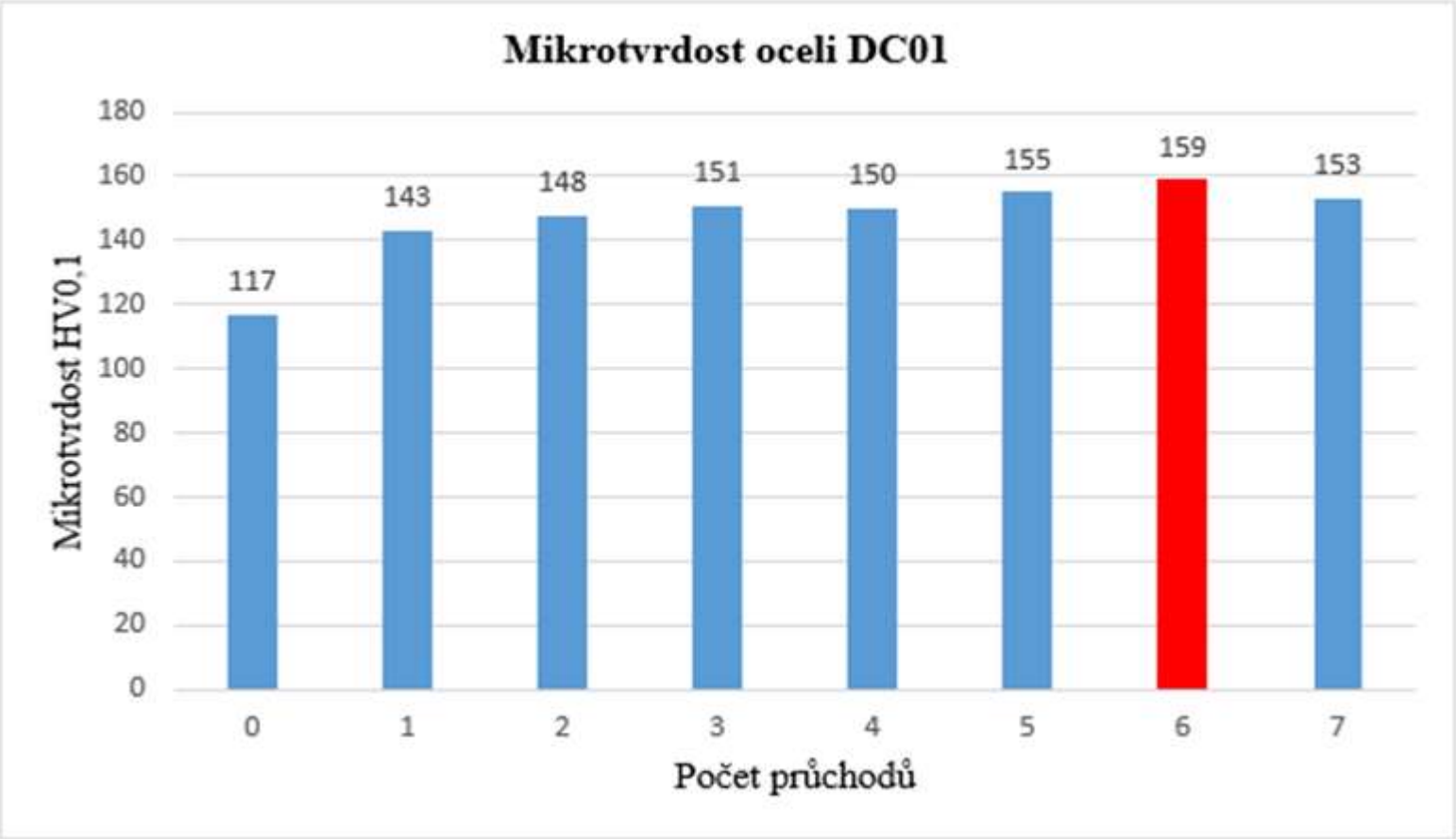
Tvrdost oceli DC01

Po 1. průchodu došlo k navýšení tvrdosti (HV10) ve srovnání s výchozím stavem o 54,8%.

Mikrotvrdost oceli DC01

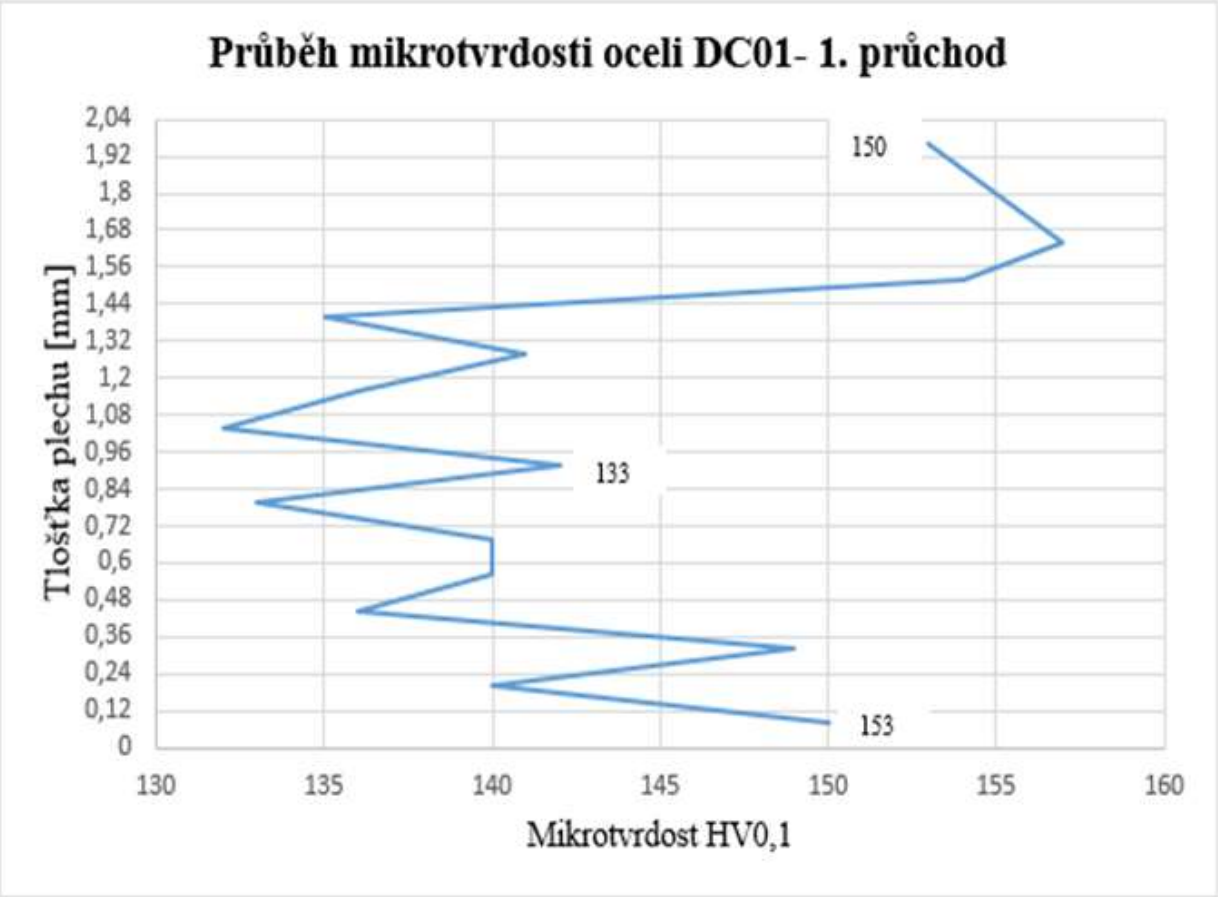
Číslo měření	Počet průchodů							
	0 (VS).	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1	113	150	156	156	152	160	174	163
2	113	140	168	156	156	163	171	168
2	115	149	147	158	157	162	162	154
4	114	136	143	150	153	138	158	148
5	116	140	145	140	136	153	170	148
6	113	140	138	143	134	148	156	134
7	111	133	143	140	136	146	158	133
8	115	142	137	138	145	144	151	144
9	117	132	135	142	139	152	146	145
10	117	136	140	143	148	153	154	144
11	113	141	147	144	142	147	166	152
12	123	135	144	157	160	174	155	162
13	120	154	156	162	152	158	154	162
14	127	157	156	165	165	160	156	171
15	126	153	172	168	172	168	156	160
Průměrná hodnota	**117**	**143**	**148**	**151**	**150**	**155**	**159**	**153**

Mikrotvrdost HV0,1 oceli DC01



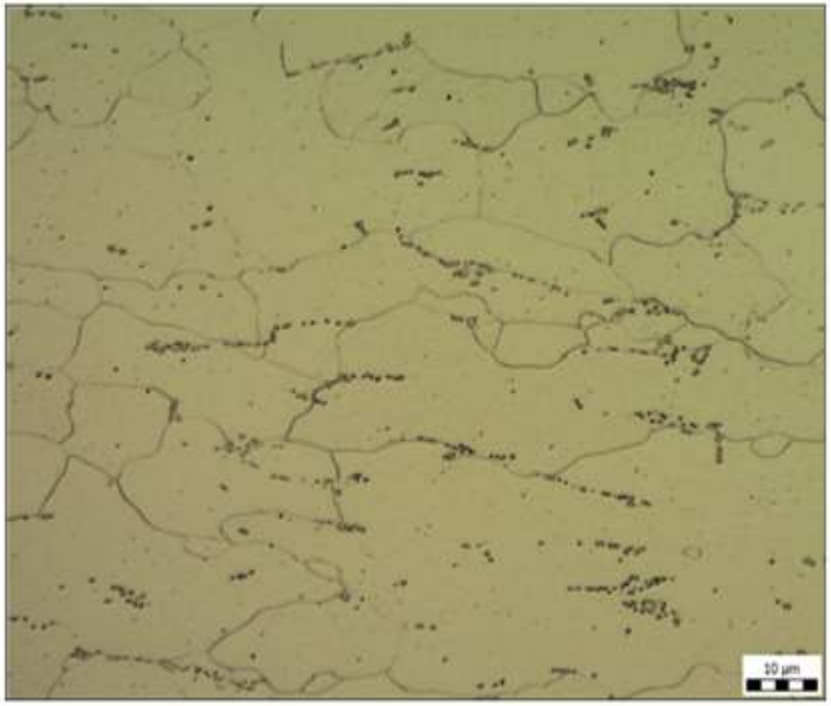
Po 1. průchodu došlo k navýšení mikrotvrdosti (HV0,1) ve srovnání s výchozím stavem o 22,2%.

Mikrotvrdost HV0,1 oceli DC01

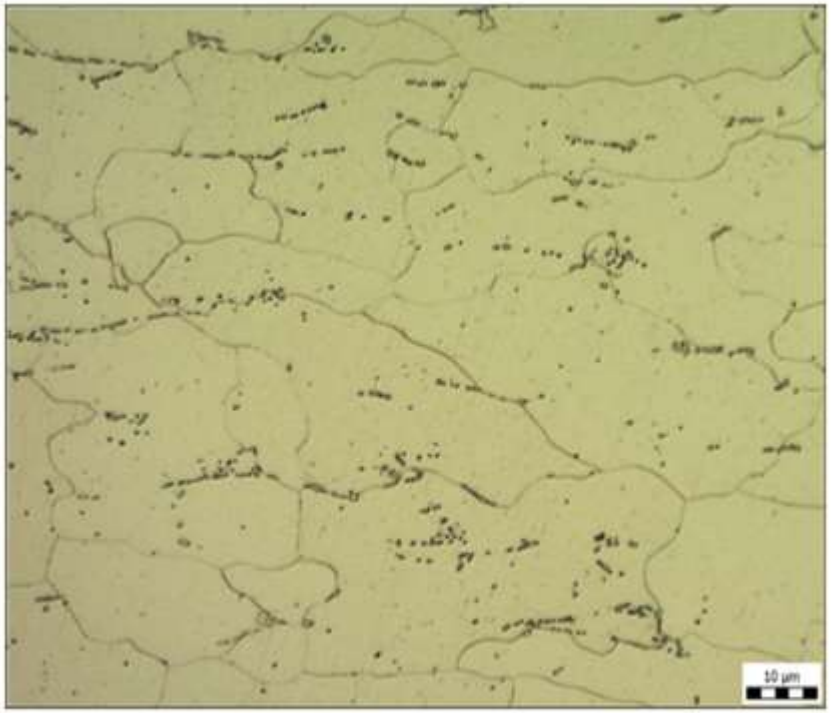


Průběh mikrotvrdosti v tloušťce plechu

Mikrostruktura (DC01)



Výchozí stav, podélný směr

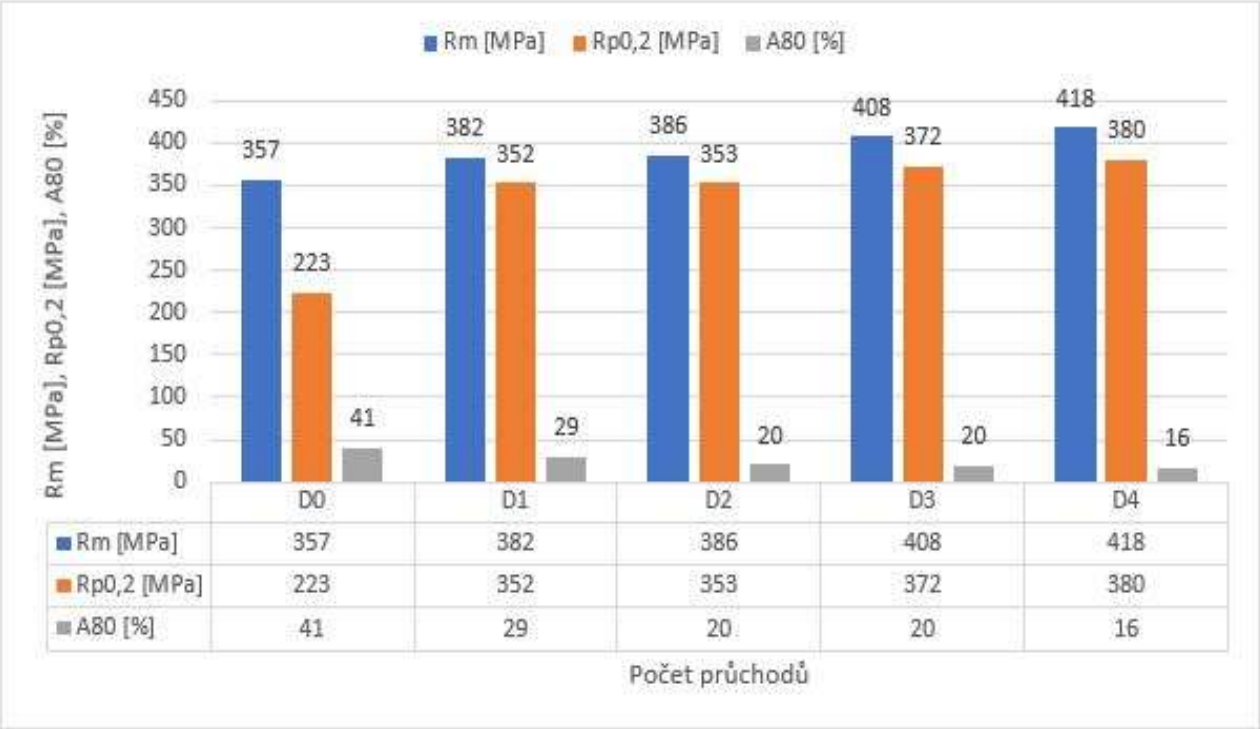


1. průchod, podélný směr

Ocel HC200AM-mechanické vlastnosti

Mechanické a chemické vlastnosti oceli HC200AM

KOSIL 200 S / HC200AM	Chemický rozbor oceli [%]					Mechanické vlastnosti		
	max. C	max. Mn	max. Si	max. P	max. S	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A [%]
	0,16	0,6	0,03	0,025	0,02	310-430	min. 200	min. 22

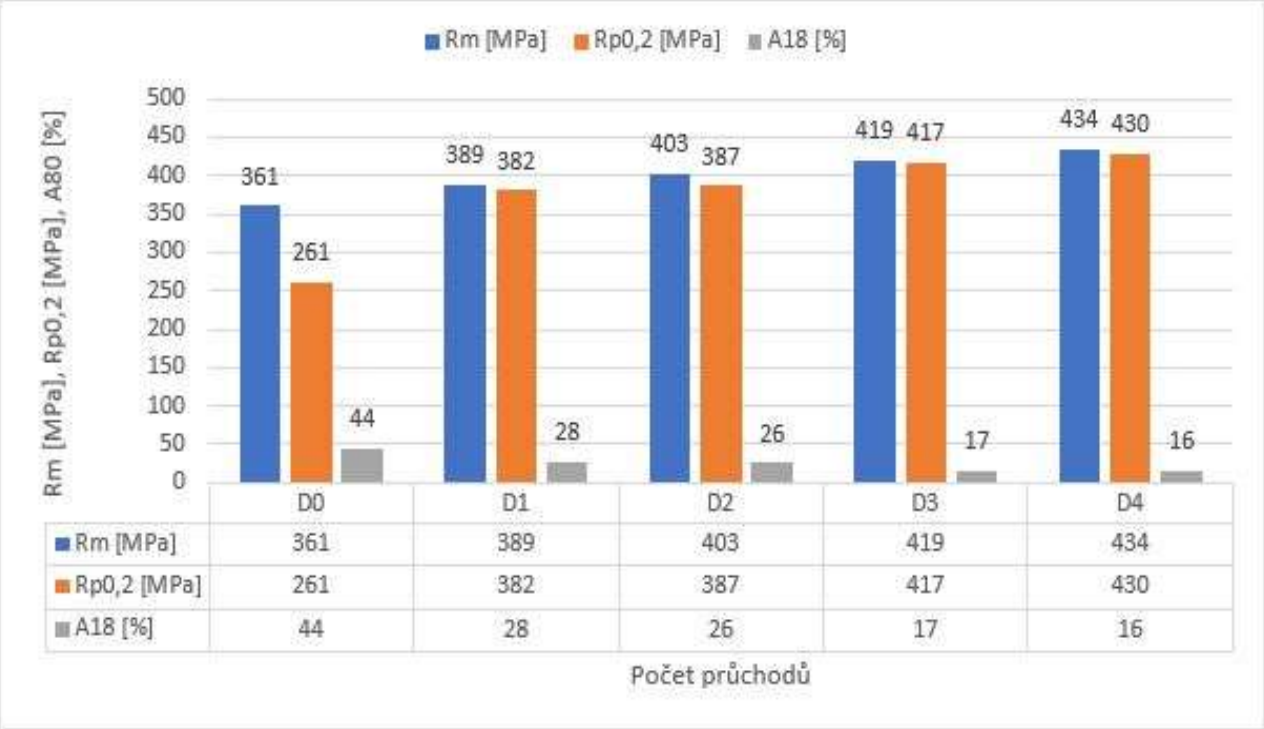


Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti oceli HC200 – vyhodnocení v podélném směru

Ocel HC200AM-mechanické vlastnosti

Mechanické a chemické vlastnosti oceli HC200AM

KOSIL 200 S / HC200AM	Chemický rozbor oceli [%]					Mechanické vlastnosti		
	max. C	max. Mn	max. Si	max. P	max. S	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A [%]
	0,16	0,6	0,03	0,025	0,02	310-430	min. 200	min. 22

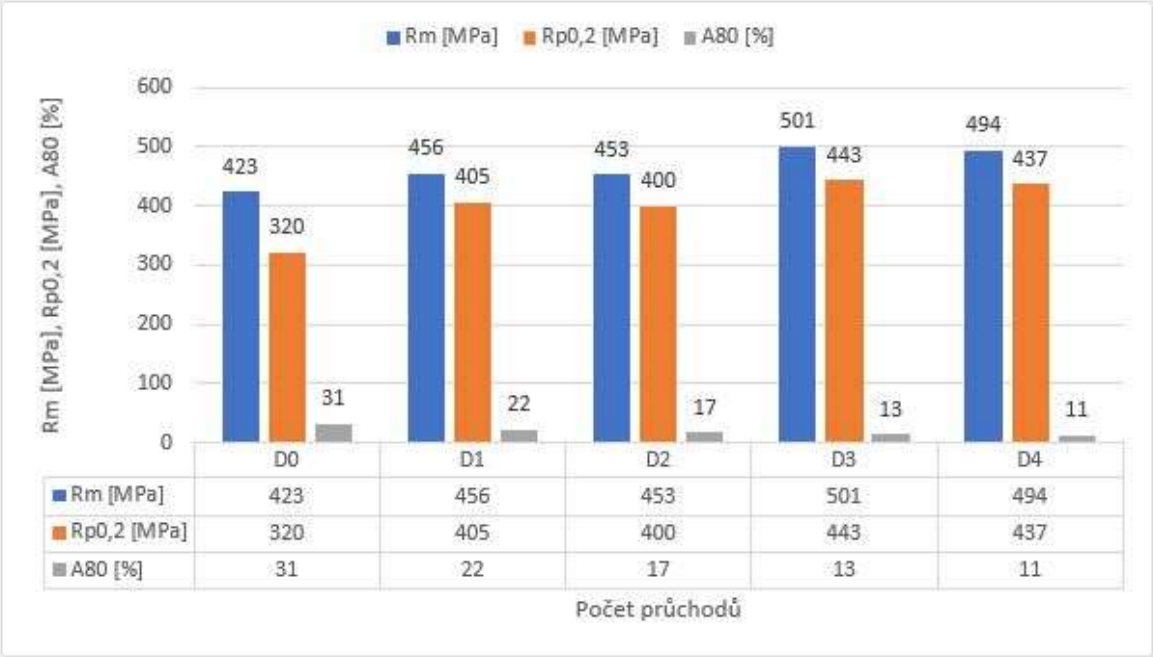


Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti oceli HC200 – vyhodnocení v příčném směru

Ocel S235JR-mechanické vlastnosti

Mechanické a chemické vlastnosti oceli S235JR

S235JR	Chemický rozbor oceli v %						Mechanické vlastnosti		
	max. C	max. Mn	max. P	max. S	max. N	max. Cu	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A [%]
	0,17	1,4	0,035	0,035	0,012	0,55	360-510	min. 235	min.19

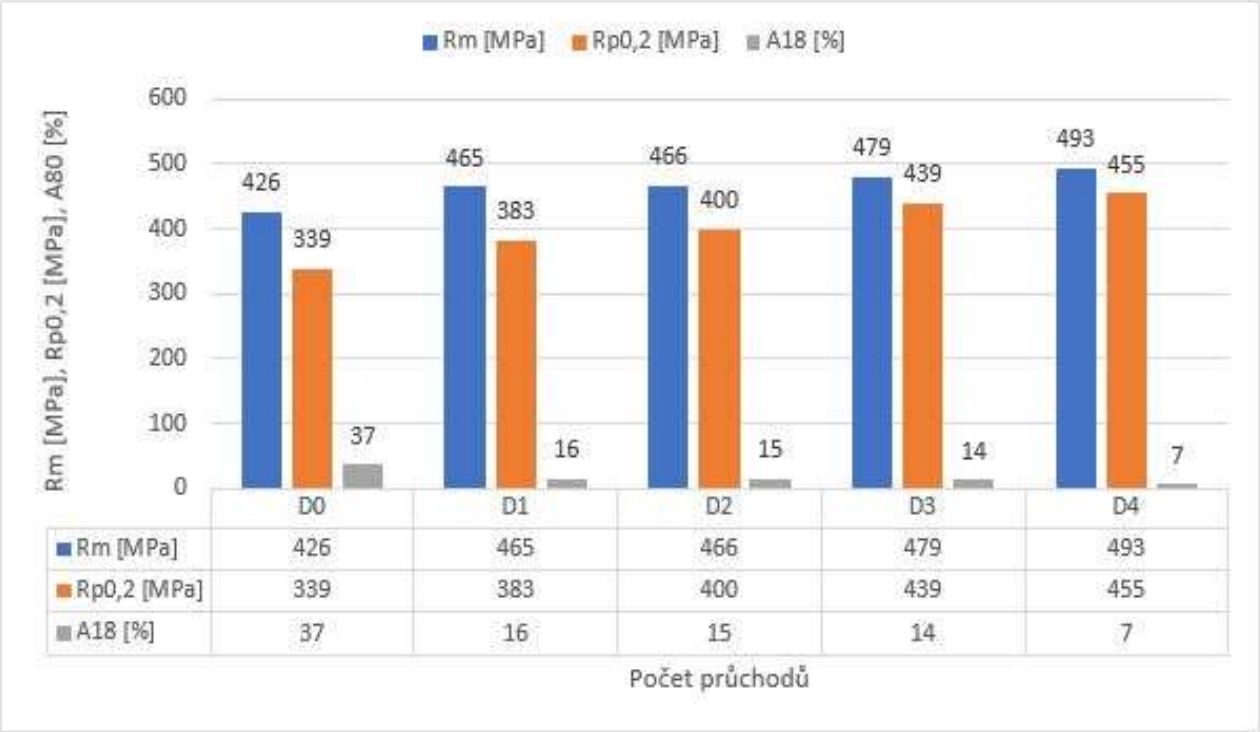


Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti oceli S235JR – vyhodnocení v podélném směru

Ocel S235JR-mechanické vlastnosti

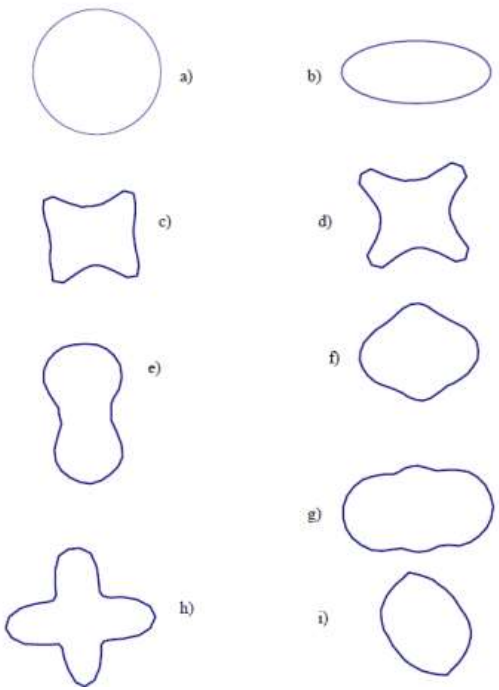
Mechanické a chemické vlastnosti oceli S235JR

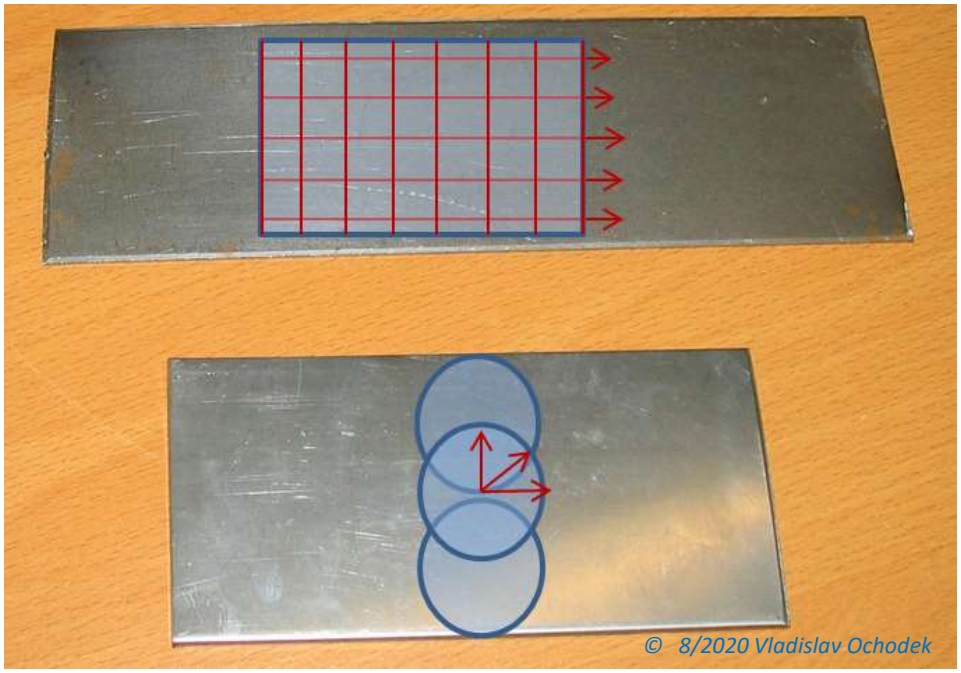
S235JR	Chemický rozbor oceli v %						Mechanické vlastnosti		
	max. C	max. Mn	max. P	max. S	max. N	max. Cu	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A [%]
	0,17	1,4	0,035	0,035	0,012	0,55	360-510	min. 235	min.19



Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti oceli S235JR – vyhodnocení v příčném směru

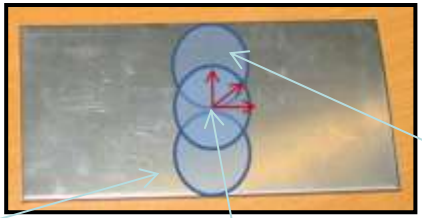
Analýza zbytkových napětí-SPD technologie DRECE- magnetoelastická metoda

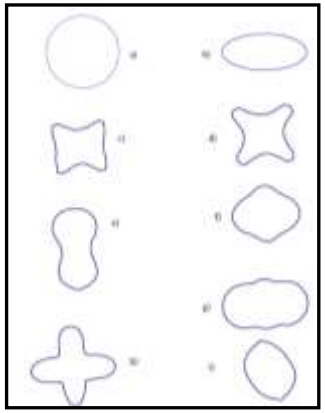


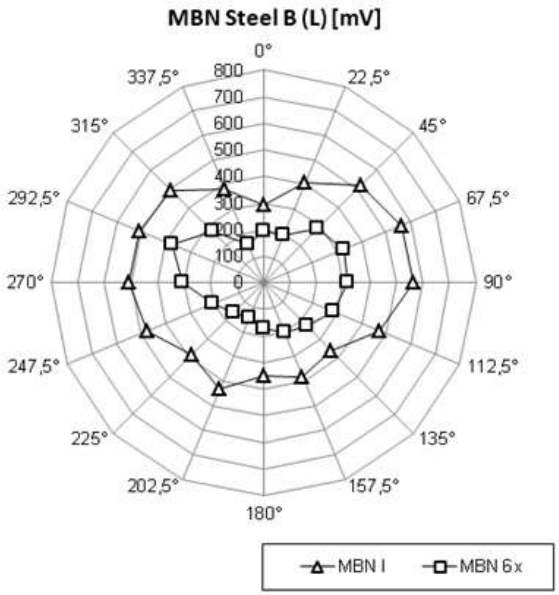


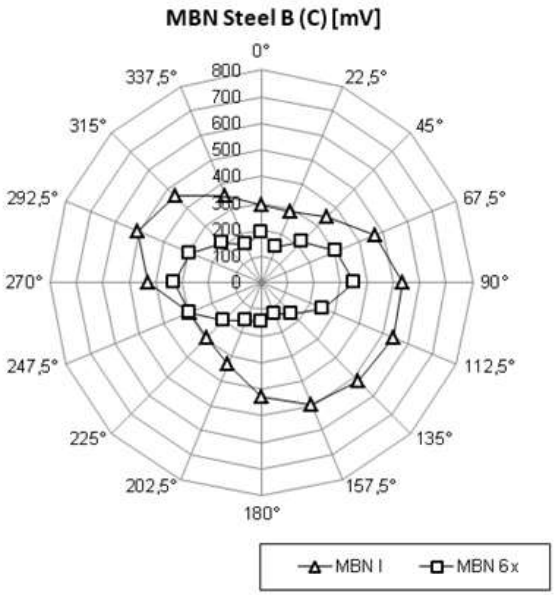
a) izotropní stav
b) mimoosé napětí v tlaku
c) ortogonální stlačení (osy nejsou na sebe kolmé)
d) ortogonální stlačení (osy jsou na sebe kolmé)
e) mimoosé ohýbání (velké)
f) ortogonální napětí (osy nejsou na sebe kolmé)
g) mimoosé ohýbání (malé)
h) ortogonální napětí (osy jsou na sebe kolmé)
i) slabá textura vzorku s malým napětím

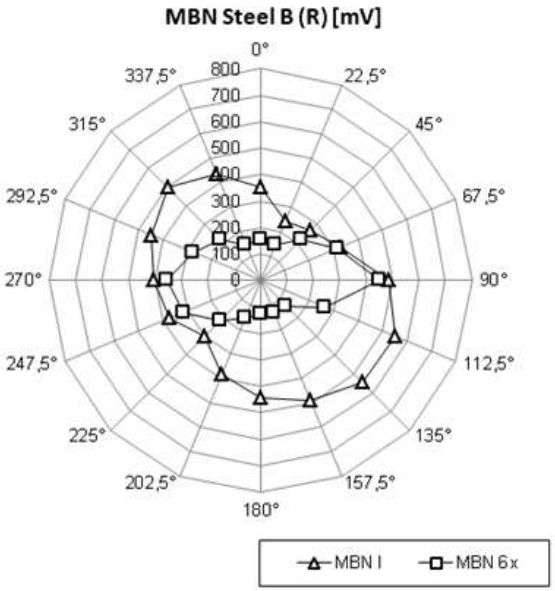
Analýza zbytkových napětí ve vybraných bodech (Ck55)



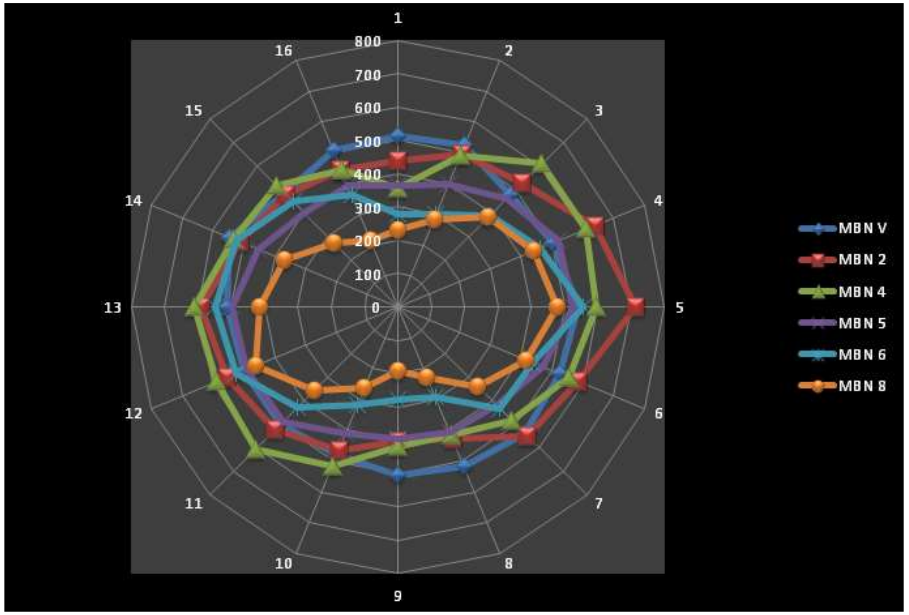


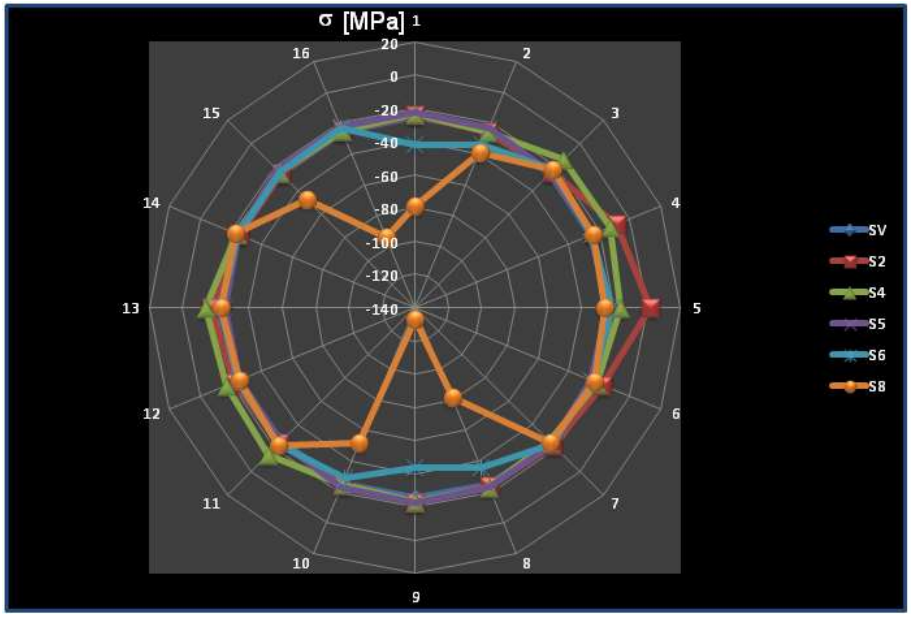


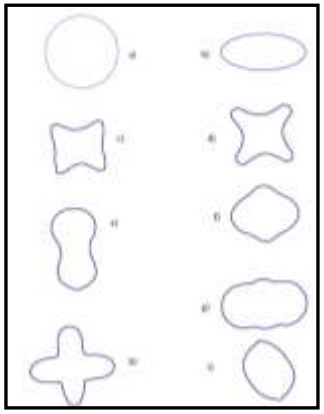




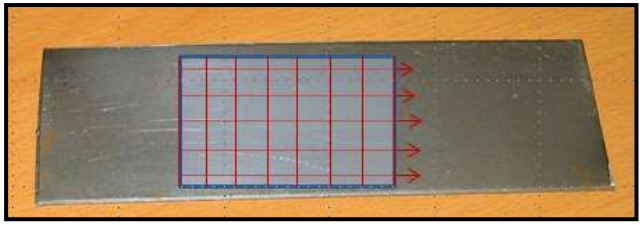
Analýza zbytkových napětí –střed pásu MBN DC01 DRECE 0 ,1-8x

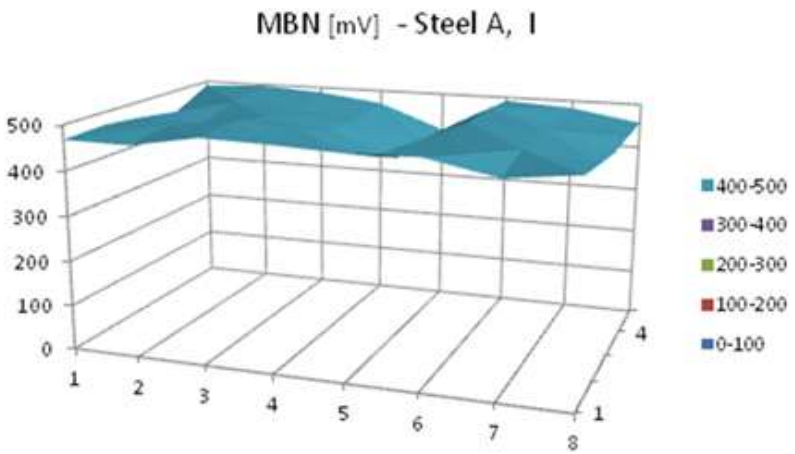




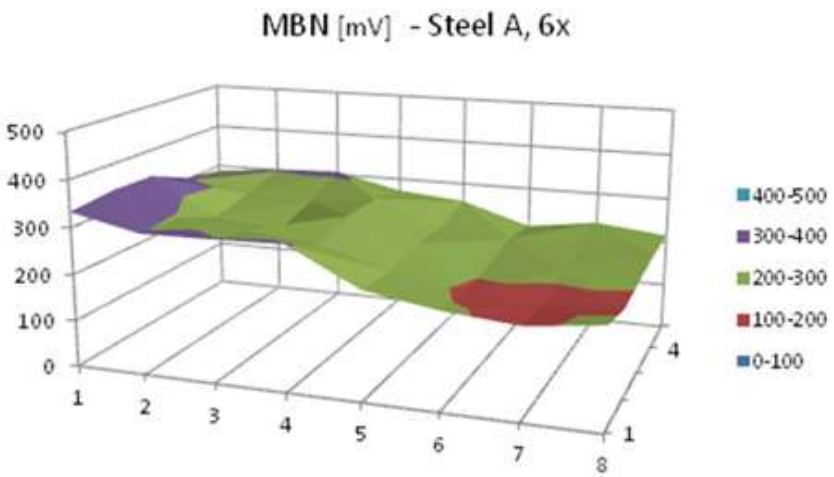


Analýza zbytkových napětí v ploše



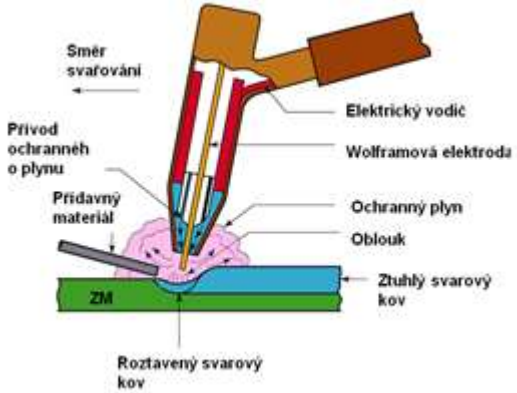


Rozložení MBN na povrchu pásu
- výchozí stav

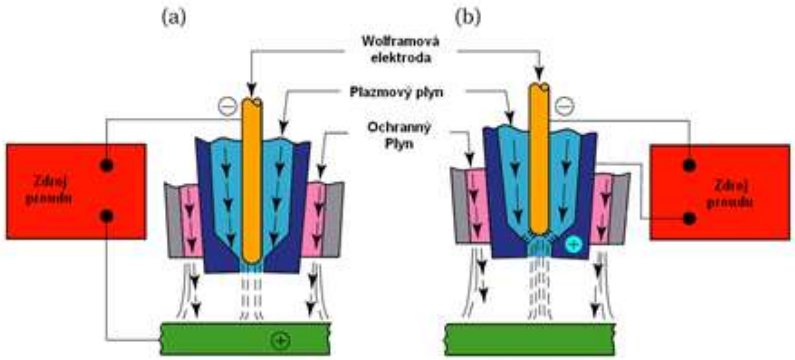


Rozložení MBN na povrchu pásu
-6x DRECE

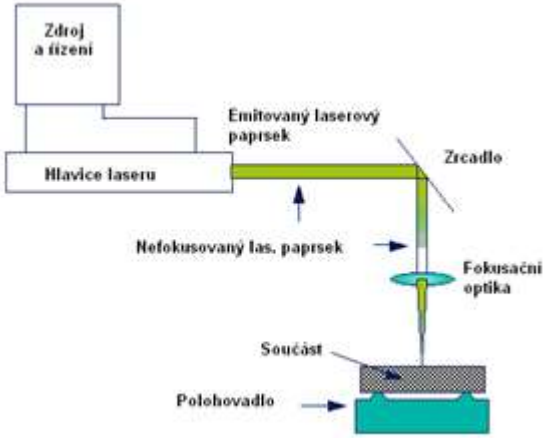
Svařování materiálů zpracovaných technologii DRECE - technologie



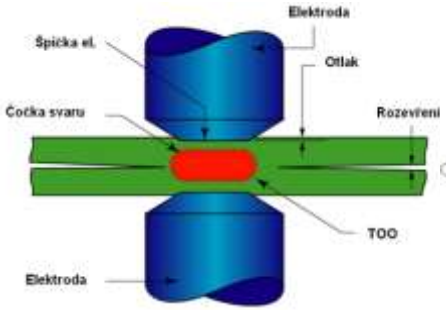
Svařování (GTAW, TIG)



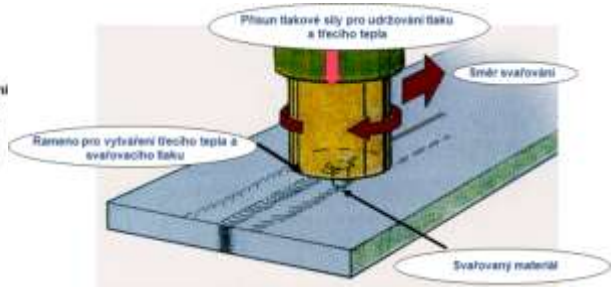
Svařování plazmou (PA,PAW)



Svařování laserem (LB)

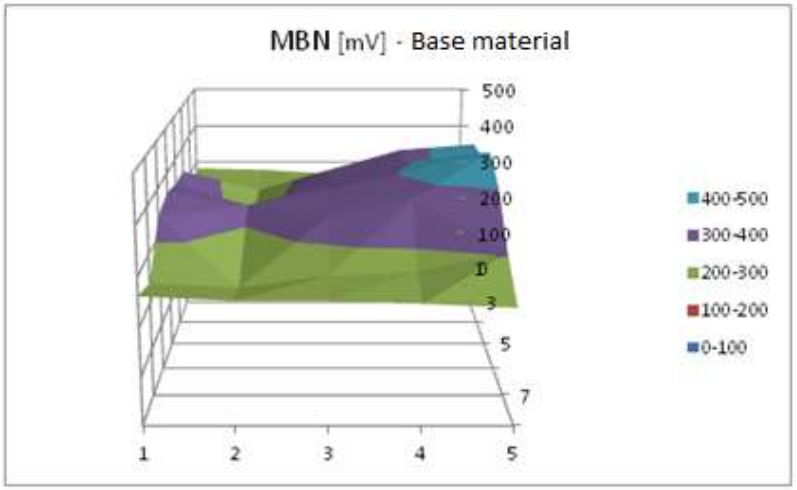


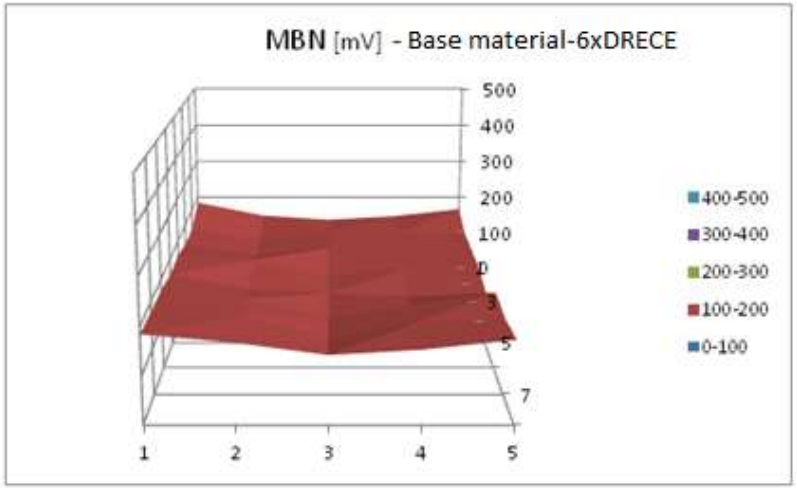
Svařování el. odporem,

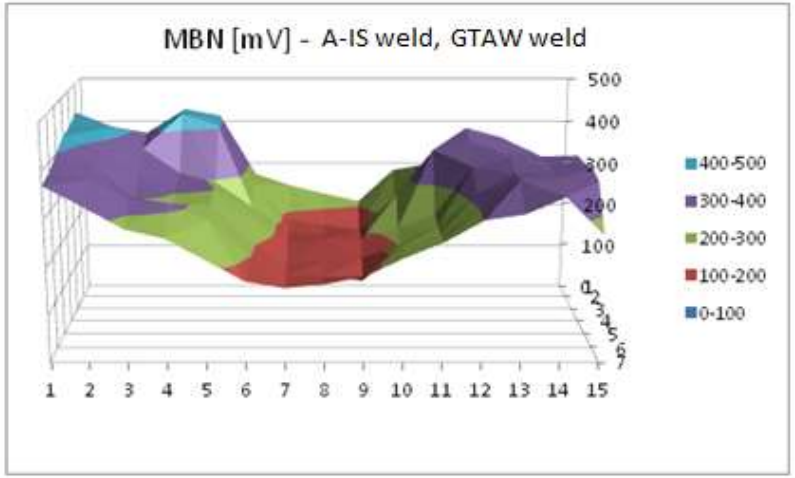


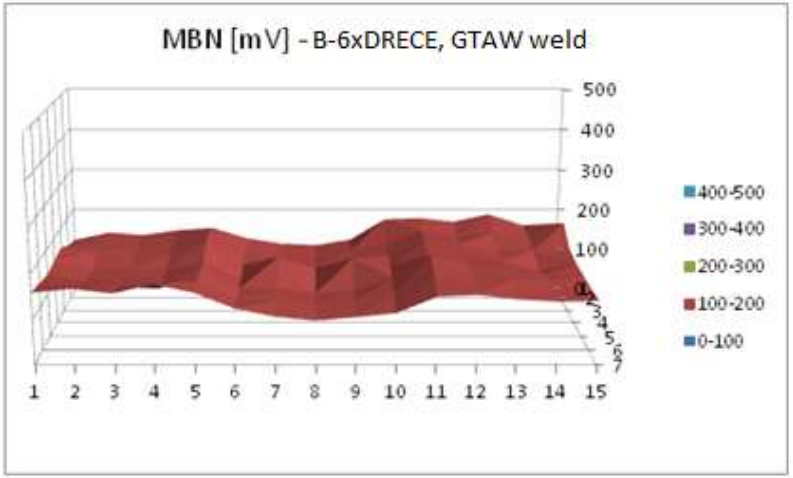
Svařování třením (FSW)

Svařování materiálů zpracovaných technologii DRECE -MBN









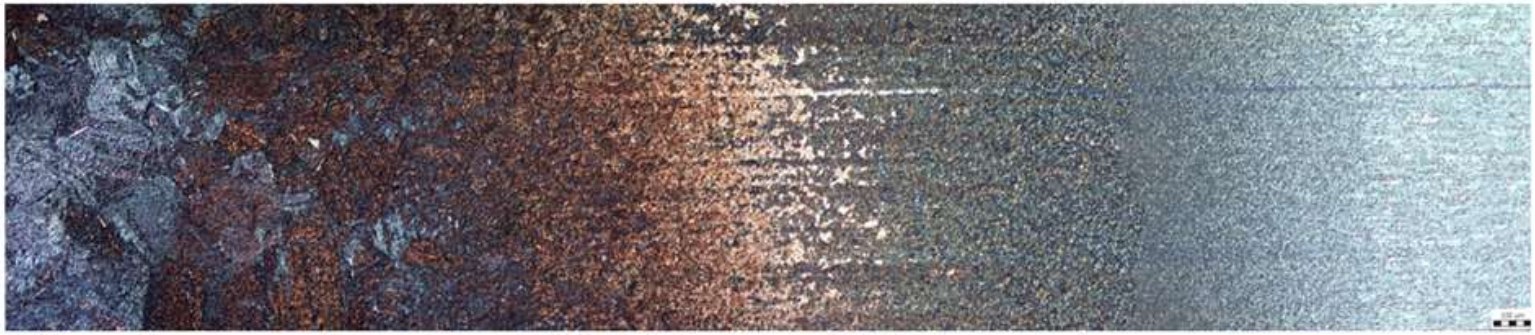
Průběh MBN svarového spoje oceli Ck55 ve výchozím stavu a po 6x DRECE, GTAW

Svařování materiálů zpracovaných technologii DRECE S355 (0x, 2x DRECE)-makrostruktura

Makrostruktura svarového spoje z oceli S355, GTAW, výchozí stav

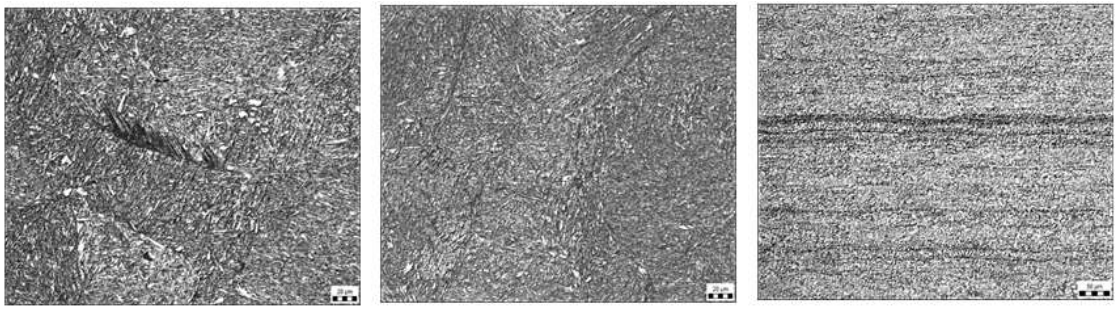
Makrostruktura svarového spoje z oceli S355, GTAW, DRECE 2x

Svařování materiálů zpracovaných technologii DRECE S355 (0x, 2x DRECE)



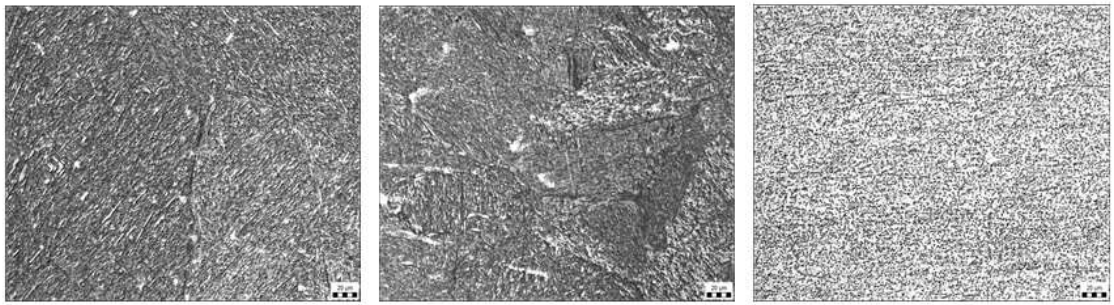
Mikrostruktura svarového spoje z oceli S355 (výchozí stav), GTAW (panorama)

Výchozí stav



SK TOO ZM

2xDRECE



SK TOO ZM

Závěr

- Nejvýraznější nárůst smluvní meze kluzu ($Rp_{0,2}$), meze pevnosti (Rm), tvrdosti (HV10) a mikrotvrdosti (HV0,1) při zachování dostatečné tažnosti (A80) **nastal po 1. průchodu tvářecím nástrojem**
- Nebyl zjištěn významný vliv anizotropie materiálu na jeho výsledné vlastnosti.
- Metalografická analýza prokázala, že metoda DRECE nemá podstatný vliv na zjemnění struktury.
- Na základě vyhodnocení experimentálně dosažených výsledků bylo prokázáno, že metoda DRECE **je metoda vhodná pro zvyšování mechanických vlastní oceli DC01.**

Závěr

- Technologie DRECE vnáší do materiálu anizotropní stav napjatosti- tlakovou napjatost. Nejvyšší tlakové napětí je ve směru protlačování.
- Materiály zpracované technologii DRECE lze svařovat vybranými tavnými a tlakovými technologiemi svařování.
- Technologie DRECE nezhoršuje svařitelnost daných materiálů.

Děkujeme za pozornost

Kontakt:

stanislav.rusz@vsb.cz

vladislav.ochodek@vsb.cz

rostislav.zabystrzan@steeltec.cz