

## Prokalitelnost

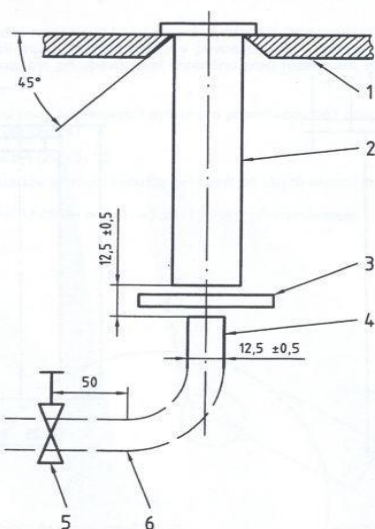
**Prokalitelnost** se rozumí hloubka průniku zákalné struktury směrem od povrchu kaleného dílu. Snahou při kalení je, aby zákalnou strukturu tvořil především martenzit, vznikající strukturální přeměnou austenitu při rychlém ochlazení v kalicím prostředí (voda, olej). Podíl tvrdého martenzitu ve struktuře kaleného dílu závisí na ochlazovací rychlosti a druhu oceli, ze které je díl vyroben. Rychlost ochlazení je nejvyšší na povrchu dílu a směrem ke středu průřezu klesá. Legující prvky, především Mn, Cr, Mo posouvají počáteční teplotu vzniku martenzitu k vyšším teplotám a proto k přeměně na martenzit dochází i při pomalejší rychlosti ochlazení v místech vzdálenějších od povrchu. Legované oceli mají proto na rozdíl od uhlíkových ocelí větší prokalitelnost. Obsah uhlíku v oceli naproti tomu určuje hodnotu tvrdosti zakalené vrstvy.

Prokalitelnost je důležitou vlastností pro oceli, jejichž mechanické vlastnosti jsou závislé na martenzitické přeměně při kalení. Jsou to oceli k zušlechťování, které se po kalení pro zvýšení houževnatosti ještě popouštějí, dále oceli k cementování a k nitridování, které se před nitridací zušlechťují.

Prokalitelnost se laboratorně ověřuje Čelní zkouškou prokalitelnosti podle Jominyho. Velikost prokalitelnosti lze též stanovit výpočtem z chemického složení oceli.

### Čelní zkouška prokalitelnosti:

Tato zkouška je normována v ČSN EN ISO 642. Schéma zařízení pro kalení zkušebního tělesa je na následujícím obrázku.



- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1 Přípravek pro upevnění a vystředění zkušebního tělesa | 4 Konec trubky přívodu vody |
| 2 Zkušební těleso v držáku                              | 5 Rychlouzavírací kohout    |
| 3 Clona   | 6 Trubka přívodu vody       |

Schema zařízení pro kalení zkušebního tělesa čelní zkoušky prokalitelnosti

### Popis zkoušky:

Zkušební těleso normovaného tvaru se zahřeje na kalicí teplotu a pak rychle zavěsí do držáku. Poté se otevře rychlouzavírací kohout trubky s přívodem vody, která po odklonění clony tryská na čelo zkoušky až do jejího úplného vychlazení. Zkušební těleso se poté vyjme z držáku a na dvou protilehlých stranách povrchu tělesa se na válcové části v podélném směru obrousí plošky. Mechanicky pracující tvrdoměr, řízený procesorem, měří na obroušené ploše v předepsaných vzdálenostech od čela zkušebního tělesa tvrdost. Zařízení poté sestrojí graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od kaleného čela zkoušky, tzv. křivku prokalitelnosti, která reprezentuje prokalitelnost tavby dané značky oceli.

### Stanovení prokalitelnosti výpočtem:

Způsob výpočtu volí výrobce. Ten je však povinen metodu výpočtu na požádání sdělit odběrateli pro možnost kontroly. Jeden ze způsobů je popsán v SEP 1664 (Stahl Eisen Prüfblatt). Vzorce pro výpočet byly získány násobnou regresní analýsou statisticky významného souboru výsledků prokalitelnosti a chemického složení zkoušených taveb. Vzorce se aplikují na jednotlivé skupiny ocelí např.:

Cr-oceli k zušlechťování; CrMo-oceli k zušlechťování; MnCr-oceli k cementování a podobně.

Praxe ukázala, že hodnoty prokalitelnosti získané výpočtem dobře souhlasí s výsledky Čelní zkoušky prokalitelnosti podle Jominyho. Ta se však musí provést jako rozhodčí v případě sporu.

### Pás prokalitelnosti:

Křivky prokalitelnosti statisticky významného počtu taveb od dané značky oceli, tvoří tzv. pás prokalitelnosti, který je vymezen křivkami s maximálními a minimálními hodnotami prokalitelnosti. Uvnitř tohoto pásu se pak nacházejí všechny ostatní křivky prokalitelnosti uvažované značky oceli.

### Určování prokalitelnosti:

Jak vyplývá z následujícího obrázku, lze hodnoty prokalitelnosti určit několika způsoby:

1. Stanovit, že prokalitelnost dané značky oceli musí vyhovovat rozmezí prokalitelnosti, které je uvedeno v normě technických dodacích podmínek. Naměřená křivka prokalitelnosti pak musí ležet uvnitř pásu prokalitelnosti, který je též zobrazen v normě. To je případ tzv. normální prokalitelnosti, kde požadované hodnoty vymezují horní a spodní křivku pásu (H max. a H min.). Ve zvláštních případech je dán požadavek na omezenou prokalitelnost a to buď v horní nebo spodní části celkového rozmezí. Zjištěná křivka prokalitelnosti pak leží v horní nebo spodní části pásu. (HH max. a HH min. - křivka leží v horní části), (HL max. a HL min. - křivka leží ve spodní části).

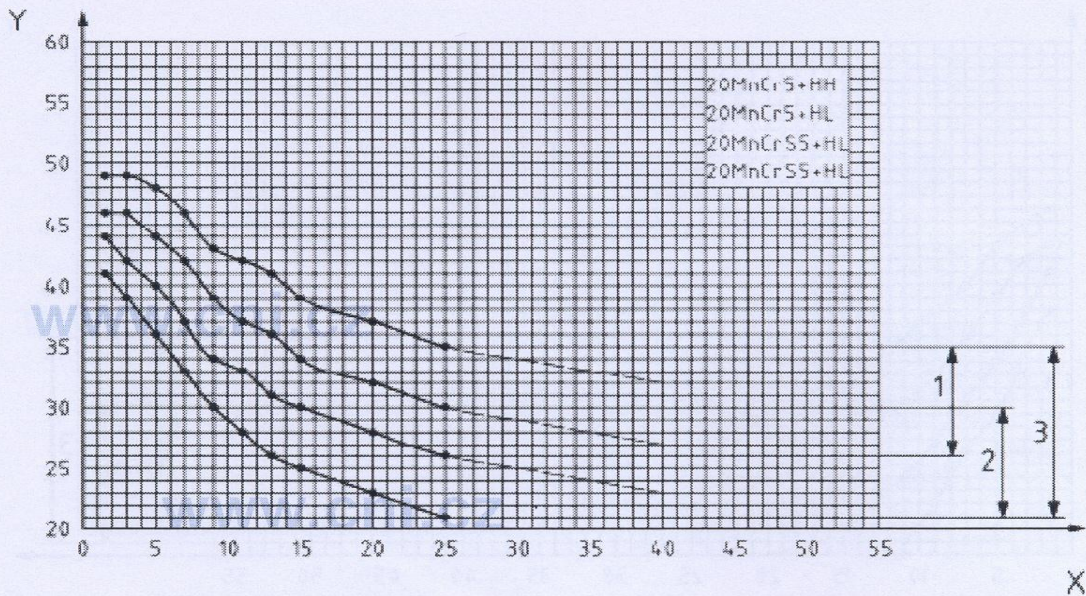
2. Prokalitelnost je určena konkrétní vzdáleností od čela Čelní zkoušky prokalitelnosti.

a) požadovaná hodnota tvrdosti musí být splněna pro dané rozmezí vzdáleností od čela zkoušky.

**J 35-6/30**

b) v dané vzdálenosti od čela musí být splněno požadované rozmezí tvrdosti.

**J 33/42-11**



**Pás prokalitelnosti oceli 20MnCr5**

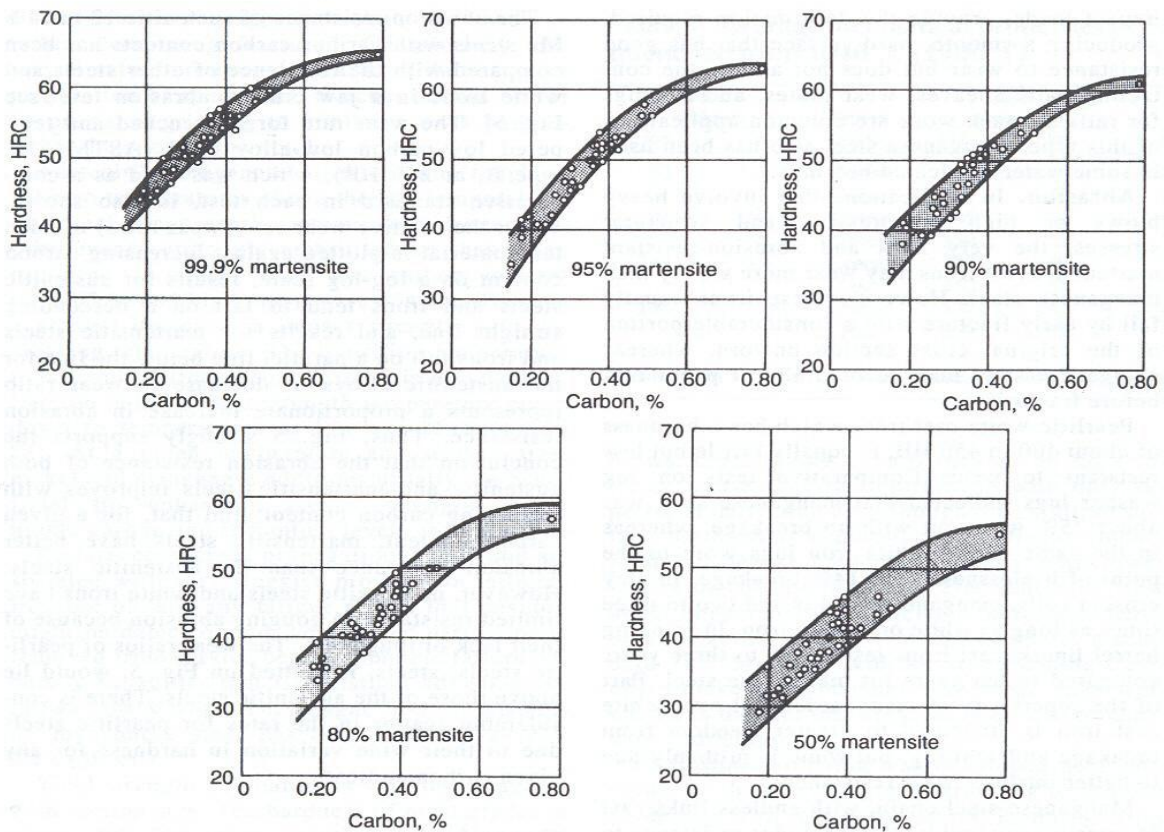
1. HH min. až HH max. ; 2. HL min. až HL max. ; 3. H min. až H max.

Z prokalitelnosti lze přibližně usuzovat na průběh tvrdosti po zakalení konkrétních dílů, za předpokladu, že rychlost ochlazování ve zvoleném místě průřezu kaleného dílu odpovídá rychlosti ochlazování v určité vzdálenosti od čela Čelní zkoušky prokalitelnosti. Na tomto principu se určuje tzv. směrodatný průřez pro mechanické vlastnosti ocelí k zušlechťování.

**Tvrdość v závislosti na obsahu martenzitu a obsahu uhlíku.**

Již bylo řečeno, že obsah uhlíku rozhodujícím způsobem ovlivňuje tvrdost po kalení. Výsledná tvrdost po kalení v daném místě průřezu reálného dílu závisí vedle obsahu uhlíku použité značky oceli též na kritické ochlazovací rychlosti, ovlivňující procentuální obsah vzniklého martenzitu. Tvrdość v závislosti na obsahu uhlíku pro struktury s různým podílem martenzitu, ukazují dále uvedené grafy.

Závislost tvrdosti na obsahu martenzitu a uhlíku zobrazují následující grafy. Uvedené grafy byly převzaty z Metals Handbook –ASM International



U zušlechťovaných dílů se příslušný díl obvykle pokládá za prokalený, pokud obsah martenzitu uprostřed průřezu dosahuje 50%. Toto kritérium však nemá obecnou platnost. Pro zvláště namáhané díly se v místě kritického namáhání požaduje obsah martenzitu 90% a vyšší. Tomuto požadavku je pak třeba přizpůsobit volbu značky oceli a podmínky kalení.

#### **Určení požadavků na prokalitelnost.**

Základní informace nutné pro určení oceli s odpovídající prokalitelností:

1. požadovaná tvrdost v kaleném stavu před popouštěním
2. požadovaná hloubka zakalené vrstvy.
3. kalicí medium, které by mělo být při kalení použito.

#### **Tvrdost v kaleném stavu.**

Obvykle se volí ocel, která po zakalení v doporučeném kalicím prostředí, ještě umožní dosáhnout požadované tvrdosti.

#### **Hloubka zakalení.**

Požadovaná hloubka zakalení a podíl martenzitu ve struktuře, kterého se u kaleného dílu má dosáhnout, souvisejí s prokalitelností. Optimální volba prokalitelnosti ovlivňuje výrobní náklady. Ku příkladu pro díly středně namáhané v ohybu může být dostačující, aby struktura obsahovala po kalení 80% martenzitu ve třech čtvrtinách průřezu hotového výrobku. Díly méně namáhané v ohybu, u nichž vnější části jsou jen mírně zatěžovány pak mohou být zakaleny i do menší hloubky pod povrchem. Naproti tomu díly namáhané v tahu a díly, kde je požadována vyšší pevnost, jako jsou např. všechny druhy pružin, musí být prokaleny v celém průřezu.

Obecně nemá být hloubka prokalení větší, než je požadováno pro docílení pevnosti, která odolá zatížení v dané hloubce pod povrchem dílu. Proto je vhodné volit ocel, která právě vyhoví daným požadavkům. V opačném případě se zbytečně navyšují náklady za použití dražšího druhu oceli, která může mít navíc horší technologické vlastnosti.

#### **Kalicí prostředí.**

Ochlazovací potenciál kalicího prostředí je kritickým faktorem v procesu tepelného zpracování, poněvadž přispívá k dosažení požadovaného prokalení. Ochlazovací potenciál a razanci kalení lze v širokých mezích ovlivnit volbou kalicího media, pohybem kalicího media v kalicích lázních a různými aditivami pro zvýšení ochlazovací schopnosti media.

Obecně platí: čím razantnější je kalicí prostředek a čím složitější je tvar kaleného dílu, tím větší mohou být rozměrová a tvarové změny po kalení a také nebezpečí vzniku kalicích trhlin.

#### **Vliv velikosti austenitického zrna.**

Velikost austenitických zrn vzniklých po ohřevu na austenitizační teplotu ovlivňuje prokalitelnost, ale také charakter struktury po kalení. Hrubé austenitické zrna vytváří po kalení hrubé jehlice martenzitu. Hrubý martenzit je podstatně křehčí než jemný.

Prokalitelnost uhlíkových ocelí může vzrůst až o 50% při zvětšení austenitického zrna z hodnoty 8 na hodnotu 3 podle ASTM. V menší míře platí tato závislost také u ocelí legovaných. Poněvadž však též záleží na charakteru struktury po kalení, volí se obvykle kompromis a předepisovaná velikost austenitického zrna pro oceli k zušlechťování a k cementování je v rozmezí 5 až 8 podle ASTM.

Velikost austenitického zrna se stanovuje metodou podle McQuaid-Ehn podle EN ISO 643 nebo podle ASTM E-19.

#### **Vliv legujících prvků.**

Příspěvek jednotlivých přísadových prvků na prokalitelnost je různý. Výrazně přispívají Mn, Mo a Cr. Také Ni zvyšuje prokalitelnost, ale jeho příspěvek vzhledem k ceně přísady je méně výhodný. Nikl se uplatňuje v niklových ocelích hlavně pro zvýšení houževnatosti. Zcela vyjimečné je působení bóru již ve velmi malých koncentracích, řádově v tisícinách procenta. Z hlediska prokalitelnosti proto bórové oceli předčí i některé nízkolegované oceli komplexně legované. Má-li však bór plnit svoji funkci, musí být ocel při výrobě dokonale dezoxidována a denitřifikována.

Vliv legujících přísad na prokalitelnost lze posoudit také z pásu prokalitelnosti jednotlivých značek ocelí. Výrazný rozdíl shledáme zejména mezi uhlíkovými a legovanými ocelmi.

#### **Prokalitelnost cementované vrstvy oceli k cementování.**

Zjišťování prokalitelnosti cementované vrstvy slouží ke sledování procesu cementace a následného kalení. Dále k určení schopnosti dané oceli dosáhnout požadované tvrdosti a požadovaných vlastností nauhličené vrstvy u dílů, které jsou z takové oceli vyrobeny.

Stanovení prokalitelnosti cementované vrstvy se provádí následovně:

Standardní těleso pro Čelní zkoušku prokalitelnosti se cementuje v prášku ca 8 hodin při teplotě 925°C a následně z čela kalí (viz zkouška prokalitelnosti podle Jominyho). Současně se cementuje ještě jedno zkušební těleso pro určení nauhličené vrstvy. Z tohoto druhého tělesa se nauhličená vrstva postupně po jednotlivých vrstvách obrábí a materiál z každé vrstvy se analyzuje na obsah uhlíku. Tím se zjistí hloubka ve které se nacházejí jednotlivé úrovně obsahu uhlíku na zkušebním tělese. Lze předpokládat, že stejné rozvrstvení nauhličení je též na druhém, zakaleném zkušebním tělese. Na tomto tělese se pak obrušují v podélném směru plošky s výskytem obsahu uhlíku 1,1; 1,0; 0,9 až 0,6 %. Na každé takové ploše se pak směrem od čela měří tvrdost, podobně jako u klasické zkoušky prokalitelnosti. Pro měření se doporučuje použít metodu Rockwell A, která dává menší rozměr vtisku. Získané hodnoty se pak přepočítají na metodu HRC. Z výsledků se sestrojí křivky prokalitelnosti pro jednotlivé obsahy uhlíku, tj. průběh tvrdosti v závislosti na vzdálenosti od čela zkoušky pro jednotlivé vrstvy.

#### **Stanovení hodnot prokalitelnosti výpočtem podle SEP (Stahl-Eisen-Prüfblatt) 1664.**

V SEP 1664 se uvádí, že výsledky stanovení prokalitelnosti podle EN ISO 642 resp. DIN 50 103 část 1 jsou v podstatě ovlivněny způsobem odběru vzorku, přípravou zkušebního vzorku a způsobem zakalení. Pro vyloučení různých nahodilostí v procesu provádění Čelní zkoušky prokalitelnosti se nyní ve větší míře dává přednost určení prokalitelnosti výpočtem. Pokud se prokalitelnost výpočtem uvádí v dokumentech kontroly (atestech), má odběratel právo vyžadovat na výrobci oznámení postupu výpočtu (výpočtový vzorec).

Pro stanovení prokalitelnosti jednotlivých skupin ocelí uvádí SEP 1664 výpočtové vzorce odvozené lineární regresní analýzou z výsledků prokalitelnosti značek ocelí stanovené metodou podle EN ISO 642 a chemického složení statisticky významného počtu taveb od různých výrobců.

Vzorcem pro výpočet je obecně polynom následujícího tvaru:

**Tvrdost ve vzdálenosti od kaleného čela zkoušky (HRC) =**  
 **$a_0 + a_1 \cdot C + a_2 \cdot Si + a_3 \cdot Mn + a_4 \cdot P + a_5 \cdot S + a_6 \cdot Cr + a_7 \cdot Mo + a_8 \cdot Ni + a_9 \cdot Al + a_{10} \cdot Cu + a_{11} \cdot N$**

(za značky prvků se dosazují jejich obsahy v tavně v hmot. %)

**Příklady:**  
**chromo-molybdenová ocel k zušlechťování 42CrMo4 (1.7225)**

Chemické složení v hmot. %											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
Min.	0,160	0,100	0,580	0,005	0,003	0,809	0,120	0,050	0,006	0,050	0,0050
Max.	0,457	0,350	0,920	0,028	0,059	1,222	0,284	0,340	0,052	0,490	0,0208
Střed	0,326	0,250	0,750	0,013	0,023	1,057	0,208	0,161	0,032	0,171	0,0091
1s	0,080	0,040	0,060	0,004	0,008	0,073	0,030	0,068	0,007	0,059	0,0051

Multiplikační koeficienty pro jednotlivé prvky													
J	m	konst.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
1,5	277	33,71	58,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3		31,25	58,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	23,35	0,00	22,24
5		23,89	62,82	0,00	0,00	0,00	0,00	5,28	0,00	0,00	29,95	0,00	00,00
7		10,50	79,12	0,00	0,00	0,00	0,00	8,40	11,27	0,00	59,91	0,00	0,00
9		-4,17	94,59	6,64	0,00	0,00	0,00	10,88	24,86	0,00	81,55	0,00	0,00
11		-16,60	106,21	10,65	0,00	0,00	0,00	13,13	34,75	0,00	92,87	5,29	0,00
13		-31,66	114,77	10,64	9,58	0,00	0,00	15,53	34,95	0,00	101,22	7,36	0,00
15		-39,45	118,26	10,03	13,37	0,00	0,00	17,01	35,77	0,00	109,66	8,84	0,00
20		-47,19	113,70	7,94	17,38	87,67	0,00	19,05	35,99	0,00	110,85	8,33	0,00
25		-47,18	105,78	0,00	19,27	100,87	0,00	20,53	32,95	0,00	104,29	7,87	0,00
30		-44,18	97,00	0,00	18,89	93,66	0,00	20,78	28,03	0,00	87,54	7,51	0,00
35		-42,37	90,00	7,25	16,78	110,92	0,00	20,53	24,72	0,00	78,93	8,15	0,00
40		-37,78	83,92	0,00	14,44	102,58	0,00	20,96	23,86	0,00	80,13	7,10	0,00

J = vzdálenost od čela zkoušky v mm; m = počet hodnocených taveb; konst. = konstanta.

Příklad výpočtu prokalitelnosti namátkově zvolené tavby z oceli 42CrMo4 a porovnání výsledku s naměřenými hodnotami po provedené zkoušce podle normy EN ISO 642.

Složení tavby	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N		
	0,386	0,27	0,83	0,013	0,012	1,04	0,19	0,04	0,026	0,03	0,0063		
Vzdálenost od čela zkoušky J mm													
J	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
Tvrdość HRC													
Vypočtená	58,16	54,7	54,4	53,5	52,3	50,17	49,17	47,67	44,49	41,81	39,87	38,33	36,8
Změřená	58	54,8	53,5	52,7	53,2	51,0	49,7	48,1	43,8	42,5	40,5	37,5	37

**mangano-chromová ocel k cementování 16MnCr5 (1.7131)**

Chemické složení v hmot. %											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
Min.	0,130	0,02	1,02	0,006	0,002	0,820	0,010	0,020	0,012	0,040	0,0060
Max.	0,231	0,38	1,48	0,033	0,044	1,290	0,090	0,300	0,063	0,350	0,0180
Střed	0,179	0,20	1,22	0,013	0,026	1,057	0,045	0,125	0,035	0,158	0,0118
1s	0,019	0,08	0,10	0,005	0,005	0,104	0,018	0,053	0,008	0,056	0,0024

Multiplikační koeficienty pro jednotlivé prvky													
J	m	konst.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
1,5	220	29,27	60,38	2,43	3,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	224	26,36	65,02	2,35	4,15	0,00	0,00	0,00	0,00	-3,39	0,00	3,38	0,00
5	224	3,64	96,40	4,73	9,28	0,00	0,00	8,18	0,00	0,00	0,00	7,03	-194,23
7	224	-15,89	117,94	7,98	13,17	0,00	0,00	13,47	0,00	0,00	0,00	10,55	-251,11
9	224	-20,33	111,04	9,56	14,90	0,00	0,00	13,58	0,00	6,33	0,00	10,46	-258,53
11	224	-21,05	104,87	8,37	13,81	0,00	0,00	13,97	0,00	8,45	0,00	9,19	-205,32
13	224	-24,20	106,40	10,54	14,34	0,00	0,00	13,43	0,00	11,16	0,00	8,53	-170,83
15	224	-25,65	104,73	9,39	13,69	48,70	0,00	13,91	0,00	11,88	0,00	8,29	-142,09
20	224	-31,20	112,20	10,46	14,00	50,94	0,00	14,38	17,75	11,21	0,00	7,34	-115,28
25	217	-35,15	118,66	10,55	15,13	54,83	0,00	13,72	20,71	12,73	0,00	9,25	-126,73

J = vzdálenost od čela zkoušky v mm; m = počet hodnocených taveb; konst. = konstanta.

Příklad výpočtu prokalitelnosti namátkově zvolené tavby z oceli 16MnCr5 a porovnání výsledku s naměřenými hodnotami po provedené zkoušce podle normy EN ISO 642.

Složení tavby	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
	0,20	0,24	1,26	0,017	0,023	1,22	0,003	0,02	0,02	0,0115
Vzdálenost od čela zkoušky J mm										
J	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25
Tvrdość HRC										
Vypočtená	45,9	45,2	43,6	40,0	36,9	34,4	32,5	31,4	28,9	26,9
Změřená	45	45	43	40	37	35	32	30	28	27