Zpracování nástrojových ocelí

Tváření a tepelné zpracování

Výroba nástrojových ocelí

Ocel vyrobená konvenčními (elektrická pec + pánvová metalurgie) nebo speciálními ocelárenskými pochody (přetavování nebo prášková metalurgie) se dále zpracovává tvářením za tepla. Nejobvyklejšími hutními výrobky jsou tyčová ocel různých profilů, kované bloky nebo výkovky (např. všestranně kované kotouče a pod.). Podle druhu oceli a charakteru výrobku se ocelárenské polotovary (ingoty nebo kontislitky) nebo v případě práškové metalurgie isostaticky lisované bloky, tvářejí podle druhu oceli válcováním nebo kováním. Tváření se často děje v několika operacích, např. ingot → polotovar → tyčová ocel nebo za tepla válcovaný drát, nebo polotovar → výkovek. Mezi jednotlivými operacemi se provádí kontrola, popř. čištění polotovaru před konečným zpracováním.

Tvářením se rozruší struktura utuhlé tekuté oceli, poznamenaná strukturní nestejnorodostí (netýká se oceli vyrobené práškovou metalurgií). Tvářením se proto zlepšuje homogenita oceli. Charakteristickým znakem tyčové oceli, vyrobené konvenčním způsobem, je struktura uspořádaná do hlavního směru tváření. Proto vykazuje tyčová ocel určitý stupeň strukturní anizotropie, výraznější u ocelí s větším sklonem k segregacím (oceli nadeutektoidní). Z hlediska strukturního uspořádání, které ovlivňuje vlastnosti, jsou výhodnější tvarové výkovky, které se tvářejí tak, aby nebyl preferován pouze jeden směr tváření (např. všestranné kování)
.
Způsob tváření závisí na druhu oceli a je určován tvářitelností oceli, tvarem a rozměrem výrobku. Tyče z obtížně tvářitelných ocelí a tyče větších průměrů se zpravidla vyrábějí kováním. Rozrušením lité struktury se tvářitelnost zlepšuje. To umožňuje i u hůře tvářitelných ocelí kováním vyrobený polotovar dále zpracovávat na menší průřezy válcováním.

Důležitým ukazatelem pro získání optimální struktury tvářené oceli je stupeň protváření, zpravidla vyjadřovaný poměrem průřezu slitku (např. ingotu) k průřezu výkovku resp. vývalku. Minimální stupeň protváření, zaručující požadované vlastnosti, závisí opět na druhu oceli. Vyšší stupeň protváření se zpravidla požaduje u ocelí s vyšším sklonem k segregacím.

Vlastnímu tváření předchází ohřev na tvářecí teplotu. Pro každou ocel nebo skupinu ocelí je stanoven optimální interval tvářecích teplot, ve kterém tváření probíhá s nejvyšším efektem a nejmenším rizikem případného vzniku vad. Režim ohřevu je přizpůsoben typu oceli a skládá se obvykle z předehřevu a vlastního ohřevu na tvářecí teplotu. Některé druhy ocelí vyžadují pozvolný ohřev při stupňovitě se zvyšující teplotě. Dále je nutno dbát na rovnoměrné rozložení teploty v celém průřezu ohřívaného dílu po dosažení tvářecí teploty. Optimální interval tvářecích teplot bývá často poměrně úzký. Zejména během kování větších průřezů jsou proto nutné opakované příhřevy. Po každém novém příhřevu má následovat dostatečně velký úběr.

Po tváření následuje dostatečně pomalé chladnutí. Řada nástrojových ocelí je kalitelná na vzduchu a pnutí vzniklé strukturními přeměnami může vést při rychlém chladnutí ke vzniku trhlin. Ochlazování z dotvářecí teploty proto probíhá buď v pomalu stápěné peci, nebo ve vhodném isolačním zásypu.

Při tváření za tepla nelze docílit, aby povrch vývalku resp. výkovku byl zcela prostý různých nedokonalostí (otlaků, rýh apod.) nebo v extrémním případě povrchových vad (necelistvostí). Povrchová vrstva bývá také do určité hloubky oduhličena. Výrobce proto stanovuje tzv. minimální přídavky na opracování. Teprve odstraněním vrstvy, která odpovídá přídavku na opracování, se získá bezvadný povrch bez oduhličené vrstvy. U výkovků je obvyklé udávat tzv. „čistý rozměr“, kdy se po opracování dá očekávat povrch bez vad a oduhličení. Výrobce pak podle jeho výrobních možností stanoví „kovářský“ rozměr kam započítá i přídavek na opracování.

Nesprávným postupem tváření nebo vychlazování výkovku mohou vnikat vnitřní vady (různé druhy necelistvostí). Proto se hotové výkovky kontrolují i na vnitřní vady. Nejčastější je zkouška ultrazvukem. Z hlediska užitných vlastností je zejména u některých druhů nástrojových ocelí důležitá struktura ocelí. Nečastěji se hodnotí velikost a rozložení karbidické fáze, ale také velikost zrna a čistota oceli.

Tepelné zpracování hutních polotovarů

Hutní výrobky se po tváření a řízeném chladnutí zpravidla žíhají pro dosažení tvrdosti vhodné pro další zpracování. Průběh žíhání, tj. teplota a čas jsou opět závislé na druhu oceli. Pro dosažení co nejnižší tvrdosti je důležitá prodleva na doporučené teplotě žíhání a následné pomalé chladnutí pod teplotu, kdy již bezpečně neprobíhají žádné strukturní přeměny. Prodleva na teplotě se pohybuje kolem 4 hodin a pomalé chladnutí rychlostí 10 až 20 stupňů za hodinu probíhá přibližně do teploty 600o C. Po provedeném žíhání se cementit (Fr3C), vzniklý rozpadem austenitu při chladnutí z dotvářecí teploty, sferoidizuje a výsledná struktura se pak skládá s feritu a globulárního cementitu. Obecně platí, že teplota žíhání se pohybuje těsně pod teplotou Ac1, přičemž oceli s vyšším obsahem uhlíku (nadeutektoidní) a oceli s vyšším obsahem karbidotvorných prvků (např. oceli rychlořezné) se žíhají při teplotách i nad teplotou Ac1. Důvodem je u těchto ocelí malá rychlost sferoidizace cementitu.
Některé hutní výrobky, např. bloky pro kovací zápustky nebo bloky z některých ocelí pro výrobu forem na zpracování plastů, se dodávají zušlechtěné (kalené a popuštěné).

Tepelné zpracování nástrojů

Žíhání na odstranění pnutí
Účelem je snížení pnutí, které vzniká v průběhu obrábění nebo tvářením za studena. Zařazuje se do technologického postupu výroby nástroje po hrubování, před vlastním dohotovením nástroje (mezioperační žíhání), aby se pnutí neuvolňovalo až během ohřevu ke kalení. Provádí se nejčastěji při teplotách v rozmezí 600 až 650o C po dobu asi 1 hodiny s následným pomalým ochlazováním na vzduchu.

Kalení
Konečné vlastnosti nástroje se získávají kalením a následným popuštěním. Pod pojmem kalení se rozumí ohřev na teplotu austenitizace po které následuje rychlé ochlazení pod teplotu počátku vzniku martenzitu (Ms). Teplota austenitizace musí být zvolena tak, aby došlo k uvedení přiměřeného množství karbidů do roztoku a tím k obohacení austenitu uhlíkem a dalšími prvky, které se na tvorbě karbidů podílely. Uvedení karbidů do roztoku je též funkcí času, proto je nutná i prodleva na teplotě austenitizace (kalicí teplotě). Ochlazení v doporučeném prostředí musí proběhnout rychlostí, při které se co nejvíce austenitu přemění na martenzit. Přeměna na martenzit však přesto nebývá úplná a proto je nutno počítat s tzv. zbytkovým austenitem.

Ohřev na kalicí teplotu
Nástroje ke kalení se mají ohřívat pozvolna a rovnoměrně. Nerovnoměrný ohřev vede k tvarovým deformacím a v krajním případě i k trhlinám. Je proto vhodné ohřívat v několika teplotních stupních. To se týká především ocelí výše legovaných. Během ohřevu se nástroje chrání před zokujením a oduhličením povrchu. Výhodný je proto ohřev ve vakuu. Kontinuální ohřev v jedné peci lze provádět při ohřevu malých nástrojů jednoduchého tvaru, nebo i u rozměrnějších nástrojů, je-li kalicí teplota do 950oC. Zakládat tyto nástroje do pece je ekonomické při teplotě 350 až 400oC pak zvyšovat pozvolna teplotu na 550 až 600oC a po prohřátí na této teplotě pokračovat v ohřevu větší rychlostí, nejvíce však 200oC za hodinu.
Oceli s kalicí teplotou nad 950oC se ohřívají s předehřevem ve dvou stupních např. 650 a 850oC a s prodlevou na vyrovnání teplot v každém stupni. Po druhém stupni pak následuje ohřev na kalicí teplotu.

Rychlořezné oceli se v prvním stupni ohřívají při teplotě 500 až 550oC a ve druhém stupni při 850oC. U nástrojů složitějších tvarů se doporučuje ještě třetí stupeň předehřevu při 1050oC.
Doby na vyrovnání teplot se volí přibližně 0,5 min. na 1 mm tloušťky ohřívaného nástroje pro předehřev do 650oC a asi 1 minutu na 1 mm tloušťky při předehřevu na 850 až 900oC.
Kalicí teploty se pohybují 30 až 80oC nad teplotou přeměny Ac3 u ocelí podeutektoidních, popř. Ac1k u ocelí nadeutektoidních.
Po dosažení kalicí teploty v celém průřezu musí ještě následovat prodleva na této teplotě, nezávislá na velikosti průřezu. Mimo rychlořezné oceli je tato prodleva asi 10 až 15 minut, popř. 20 až 25 minut u ocelí výše legovaných. U rychlořezných ocelí jsou prodlevy s ohledem na vysoké kalicí teploty výrazně kratší.
Celková doba ohřevu potřebná k dosažení kalicí teploty v celém průřezu nástroje závisí na velikosti průřezu, na výši předehřívací a kalicí teplotě a použitém zařízení pro ohřev. K jejímu stanovení slouží různé diagramy nebo tabulky závislosti doby ohřevu na průřezu, platné pro zvolené podmínky ohřevu. Určení optimálních dob ohřevu pro konkrétní nástroj, druh oceli a typ zařízení, je však dáno hlavně zkušeností.

Ochlazování z teploty austenitizace (z kalicí teploty)
Po ohřevu za výše uvedených podmínek, kdy nástroj dosáhl kalicí teplotu v celém průřezu, následuje ochlazení v prostředí, jehož volba závisí na druhu oceli, velikosti a tvaru nástroje. Nejběžnější ochlazovací prostředí jsou voda, olej, solná lázeň nebo vzduch.
Každé z nich umožňuje jinou ochlazovací rychlost, tj. rychlost poklesu teploty ve oK za jednotku času (sec. popř. min.). Na rychlosti ochlazování z kalicí teploty závisí konečná tvrdost daná vznikem martenzitu. Pro každý druh oceli existuje tzv. kritická ochlazovací rychlost, při které ještě probíhá přeměna austenitu na martenzit. Při kalení je proto nezbytné nastavit, použitím vhodného ochlazovacího prostředí, ochlazovací rychlost pro daný druh oceli a rozměr a tvar kaleného předmětu tak, aby byla větší než kritická. Pomůckou k určení kritické ochlazovací rychlosti pro jednotlivé druhy ocelí jsou diagramy Anizotermického Rozpadu Austenitu (ARA-diagramy), které popisují průběh rozpadu austenitu a vznikající struktury při plynulém ochlazování z austenitizační teploty.
Rychlost ochlazování by neměla být větší, než je pro docílení požadované tvrdosti nezbytně nutné. V opačném případě vznikají v kaleném nástroji nadměrná pnutí, která mohou vést až k destrukci nástroje.
Uhlíkové (nelegované) oceli se s ohledem na malou prokalitelnost kalí do vody. Výjimkou jsou slabé rozměry, které lze kalit do oleje.

Legované oceli, které mají vyšší prokalitelnost, postačí většinou ochlazovat v oleji nebo na vzduchu. Teplota oleje se pohybuje v rozmezí 30 až 80oC. Tvarově složitější nástroje je vhodné kalit do oleje ještě o vyšší teplotě.

Nástroje z vysoce legovaných ocelí s velkou prokalitelností lze též kalit do roztavených solných lázní. Menší, ale přesto dostatečná ochlazovací rychlost v tomto prostředí, nevyvolává větší pnutí zejména u nástrojů tvarově složitých s rozdílnými průřezy.
Solné lázně jsou vhodné pro termální kalení, používané též k zamezení vzniku pnutí. Nástroj se kalí do solné lázně o teplotě mírně nad bodem počátku martenzitické přeměny (Ms) a po vyrovnání teplot v celém průřezu se provede dochlazení na vzduchu.
Dalším způsobem ochlazování je lomené kalení, používané pro velké nástroje např. bloky pro zápustkové kování. V těchto případech je nutné se zřetelem k velkým rozměrům zvýšit počáteční ochlazovací rychlost s tím, že vlastní martenzitická přeměna musí proběhnout při pomalém ochlazování opět z důvodů zamezení pnutí a nadměrných deformací. Používá se kombinace voda – olej nebo olej – vzduch.
Popouštění
Nástroje po kalení jsou křehké a náchylné k praskání. Proto musí bezprostředně po kalení následovat popouštění. Výše popouštěcí teploty se volí podle požadované tvrdosti resp. pevnosti.
Doporučené teploty popouštění jsou uvedeny u jednotlivých druhů ocelí (viz. materiálové listy). Při popouštění při teplotách nad 300oC je nutné nástroje předehřát asi na 300 až 350oC. Po vyrovnání teplot pak dále ohřívat rychlostí 20 až 50oC za hodinu. Popouští-li se v solných lázních, přenese se předehřátý nástroj do solné lázně zahřáté na teplotu popouštění. Doba výdrže na popouštěcí teplotě do 300oC by měla být minimálně 1 hodinu. Při vyšších popouštěcích teplotách asi 1 hodina na každých 20 až 25 mm tloušťky, minimálně ale 2 hodiny.
Nástroje z legovaných ocelí pro práci za studena a z ocelí pro práci za tepla se popouštějí obvykle alespoň 2x . Rychlořezné oceli minimálně 3x. Rychlořezné oceli legované kobaltem i více jak 3x. Při vícenásobném popouštění je prodleva na teplotě asi 2 hodiny. Teplota druhého a dalších popuštění je asi o 10oC nižší než předchozí. Násobným popuštěním se dociluje dokonalejšího rozpadu zbytkového austenitu a zároveň popuštění martenzitu, který se rozpadem zbytkového austenitu tvoří.

Zmrazování
Oceli s vyšším obsahem uhlíku a některé výše legované oceli mají teplotu konce martenzitické přeměny nižší, než je teplota místnosti. Ty po kalení obsahují větší podíl zbytkového austenitu. Ten má za následek nižší tvrdost po kalení a vznik dodatečného pnutí, které vzniká jeho postupným rozpadem. Důsledkem je vznik větších deformací a rozměrových změn. Zmrazování se provádí zejména při vyšších požadavcích na rozměrovou stálost při maximální tvrdosti. Příkladem jsou měřidla, kalibry, ložiska a cementované nástroje. Zmrazováním lze též docílit zvýšení tvrdosti řezných nástrojů např. nástrojů chirurgických z nerezavějících ocelí. Ve většině případů stačí zmrazení na teplotu – 80oC pomocí směsi lihu a pevného kysličníku uhličitého. V menší míře se u vysoce legovaných ocelí používá tekutý dusík.

Nejvyššího efektu se dosahuje termálním kalením do lázně o teplotě počátku martenzitické přeměny (Ms) a po vyrovnání teplot přenesením nástroje do zmrazovacího prostředí.
Při zmrazování dochází vždy ke zvýšení vnitřního pnutí. Proto po zmrazování musí následovat popuštění např. při teplotě 150oC.

Opakované tepelné zpracování nástrojů.
Před opakovaným tepelným zpracováním (překalování), které přichází v úvahu např. při opravném kalení nebo renovaci nástrojů, je nutné nástroj nejprve vyžíhat. Vlastní kalení s následným popouštěním se pak provádí podle výše popsaných zásad.

Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelným zpracováním se na povrchu nástrojů vytvářejí vrstvy, které mají odlišné chemické složení a také jiné vlastnosti než základní nástrojová ocel. Nejčastěji jsou to vrstvy, které zvyšují povrchovou tvrdost, odolnost proti opotřebení, popřípadě odolnost proti zadírání a odolnost proti chemickému působení.

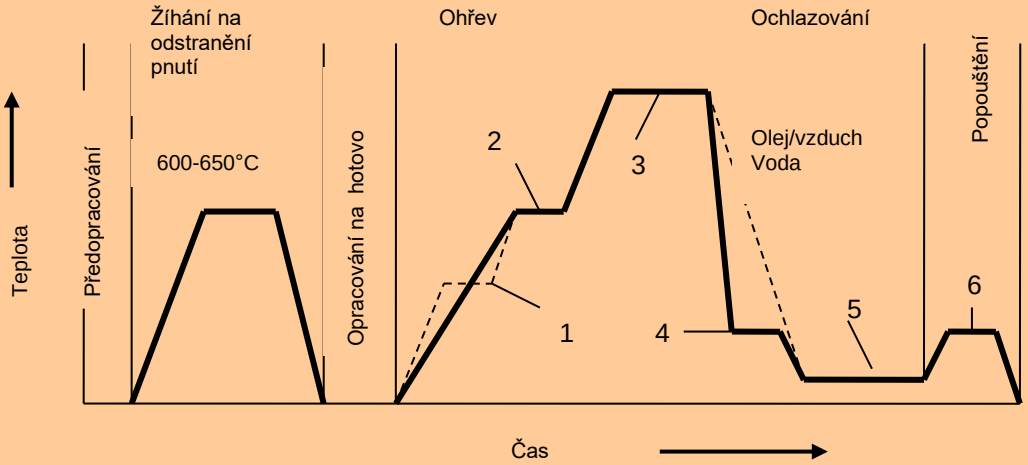
Cementování – sycení povrchu uhlíkem.
Pro nástroje určené k cementování se volí oceli s nízkým obsahem uhlíku. Norma ČSN EN ISO 4957 pro tento účel uvádí ocel 21MnCr5. V normě DIN 17 350 je také výše legovaná ocel X19NiCrMo4 (1.2764). Činnou plochou nástroje je pak kalená cementovaná vrstva o vysoké tvrdosti (např. 60HRC). Jádro nástroje je houževnaté. Postup cementování je obdobný jako u konstrukčních ocelí k cementování.

Nitridování – sycení povrchu dusíkem.
Tímto způsobem lze získat vysokou tvrdost povrchu bez následného tepelného zpracování. Nástroj se před nitridací zušlechťuje. Teplota popouštění však musí být vyšší než teplota nitridace. Vzhledem k nízké teplotě nitridace (kolem 500oC) a stálosti struktury zušlechtěné oceli, jsou rozměrové a tvarové deformace nitridovaných nástrojů prakticky zanedbatelné. Nitridovaná vrstva zvyšuje i odolnost proti korozi.
Způsoby nitridace byly popsány v Technické příručce pro tyčovou ocel z konstrukčních ocelí.

Sulfonitridování – povrchové vrstvy sycené dusíkem a sírou.
Vzniklá vrstva má kombinované vlastnosti. Vedle tvrdých nitridů, zvyšujících odolnost proti opotřebení, působí síra jako „mazivo“. Povrch nástroje opatřený touto vrstvou je proto i při vysoké tvrdosti méně náchylný k zadírání.

Zvláštní úpravy povrchu – pro speciální účely se používá boridování nebo tvrdé chromování. Pro zvýšení odolnosti proti opotřebení se na funkčních plochách nástrojů též vytvářejí povlaky na bázi karbidu nebo nitridu titanu.

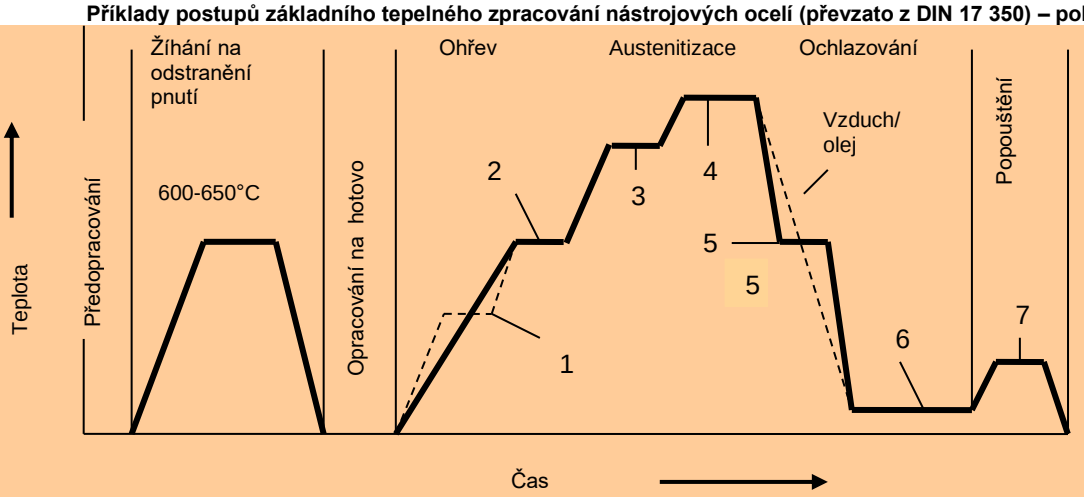
Příklady postupů základního tepelného zpracování nástrojových ocelí (převzato z DIN 17 350)



1 – první předehřev (0,5 min/mm ~ 400°C); 2 – druhý předehřev (0,5 min/mm ~ 650°C);
3 – kalicí teplota; 4 – teplá lázeň ~ 200°C; 5 – vyrovnávací teplota 1 hod. na 100 mm tloušťky;
6 - popouštění 1hod. na 20 mm tloušťky / vzduch.

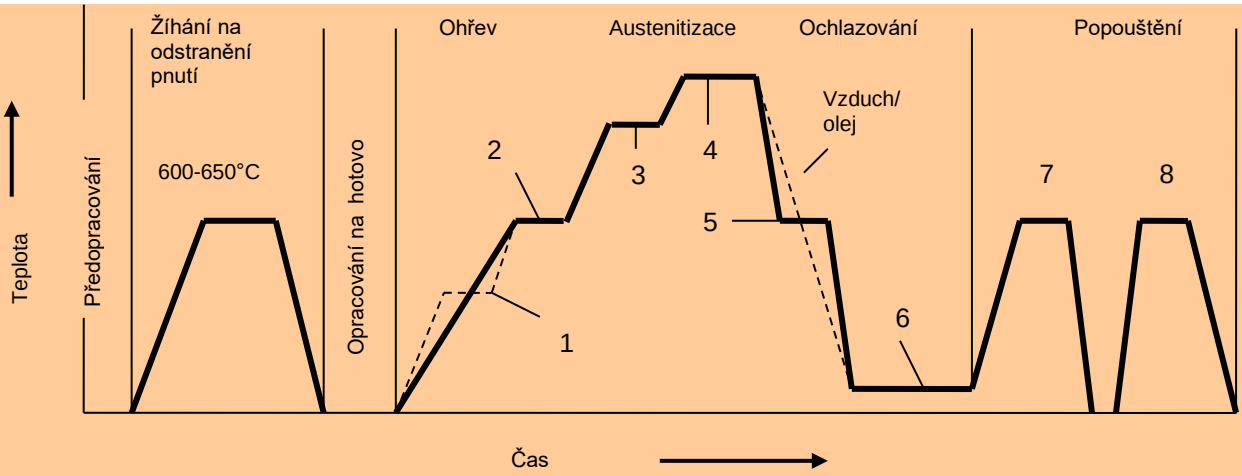
Průběh tepelného zpracování v závislosti teplota – čas, nástrojů z nelegovaných a legovaných ocelí pro práci za studena a za tepla s kalicí teplotou do 900°C.

Příklady postupů základního tepelného zpracování nástrojových ocelí (převzato z DIN 17 350) – pokračování



1 – první předehřev (0,5 min/mm ~ 400°C); 2 – druhý předehřev (0,5 min/mm ~ 650°C);
3 – třetí předehřev (1 min /mm ~ 850°C); 4 – kalicí teplota; 5 – teplá lázeň 500 až 600°C;
6 – vyrovnávací teplota 1 hod. na 100 mm tloušťky; 7 - popouštění 1hod. na 20 mm tloušťky / vzduch.

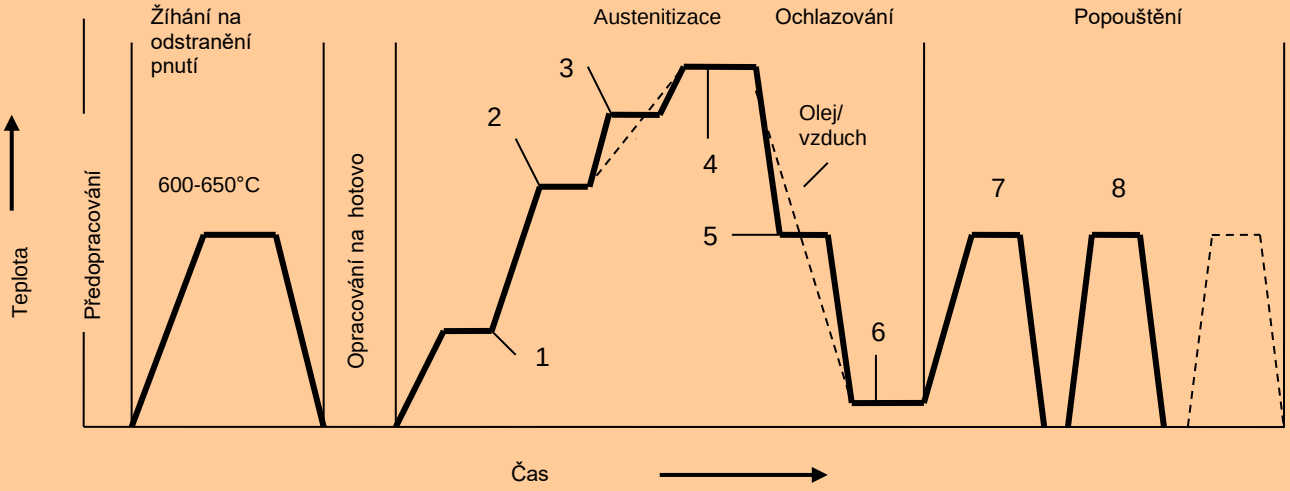
Průběh tepelného zpracování v závislosti teplota – čas, nástrojů z legovaných ocelí pro práci za studena s kalicí teplotou nad 900°C.



1 – první předehřev (0,5 min/mm ~ 400°C); 2 – druhý předehřev (0,5 min/mm ~ 650°C);
3 – třetí předehřev (1 min /mm ~ 900°C); 4 – kalicí teplota; 5 – teplá lázeň 500 až 600°C;
6 – vyrovnávací teplota 1 hod. na 100 mm tloušťky; 7 – první popouštění 1hod. na 20 mm tloušťky / vzduch;
8 – druhé popouštění - 1hod. na 20 mm tloušťky / vzduch.

Průběh tepelného zpracování v závislosti teplota – čas, nástrojů z legovaných ocelí pro práci za tepla s kalicí teplotou nad 900°C.

Příklady postupů základního tepelného zpracování nástrojových ocelí (převzato z DIN 17 350) – pokračování



1 – první předehřev (0,5 min/mm ~ 400°C); 2 – druhý předehřev - 850°C;
3 – třetí předehřev - 1050°C; 4 – kalicí teplota; 5 – teplá lázeň 500 až 600°C;
6 – vyrovnávací teplota 1 hod. na 100 mm tloušťky; 7 – první popouštění 2 hod. vzduch; 8 – druhé popouštění - 2hod. vzduch; 9 – 3. popř. další popouštění – 2 hod. vzduch.

Průběh tepelného zpracování v závislosti teplota – čas, nástrojů z rychlořezných ocelí.