

1.6 Řízené zpevňování povrchu izotermicky kalených litin

Významnou a neopominutelnou vlastností izotermicky kalených litin je jejich schopnost transformačního zpevnění iniciovaného plastickou deformací (jak již bylo zmíněno v kap. 1.3). Tato schopnost se v praxi využívá pro řízené zpevňování povrchu některých součástí z ADI/AGI, zpravidla pomocí kuličkování. Experiment s řízeným zpevněním povrchu vybraných vzorků je popsán v kap. 2.4, základní informace o této technologii, o její aplikaci na ADI/AGI o i navazujících zkušebních postupech jsou obsaženy v následujícím textu.

1.6.1 Základní údaje o kuličkování a jeho využití při řízeném zpevňování povrchu izotermicky kalených litin

Kuličkování/brokování je definováno jako **bombardování povrchu materiálu (nejč. oceli) médiem skládajícím se z malých kulovitých částic za účelem vytvoření tenké vrstvy se zbytkovým tlakovým napětím**. Toto kuličkování (v angličtině shot peening) je často zaměňováno s tryskáním/otryskáváním/pískováním (v angličtině shot blasting), které se používá např. ve slévárenství k čištění odlitků a k odstranění licí kůry či např. nátěru před povrchovou úpravou. Oproti pískování je kuličkování mnohem více kontrolovatelným procesem tváření zastudena, který se používá primárně:

- **ke zlepšení únavových vlastností**
- k prevenci korozního praskání
- při ochraně formy nebo tvaru
- k získání jednotné textury.

První tři účinky jsou dány **vznikem zbytkového tlakového napětí v povrchové vrstvě** v průběhu kuličkování (viz pozn. v kap. 1.6.1.1), zatímco čtvrtý se využívá pouze pro získání jednotného vzhledu a je dán přísnou kontrolou podmínek kuličkování. V případě tryskání ADI/AGI je zde ještě jedna přidaná hodnota v podobě příznivé reakce materiálu na tváření zastudena – **plastickou deformací iniciované martenzitické přeměny**. [8], [12], [14]

1.6.1.1 Teorie

K pochopení toho, proč je kuličkování efektivním nástrojem pro zlepšení únavových vlastností, jež jsou prvořadým hlediskem pro ADI/AGI, je nezbytné porozumět následující teorii. Je známo, že únavové lomy vznikají ve sledu těchto tří událostí:

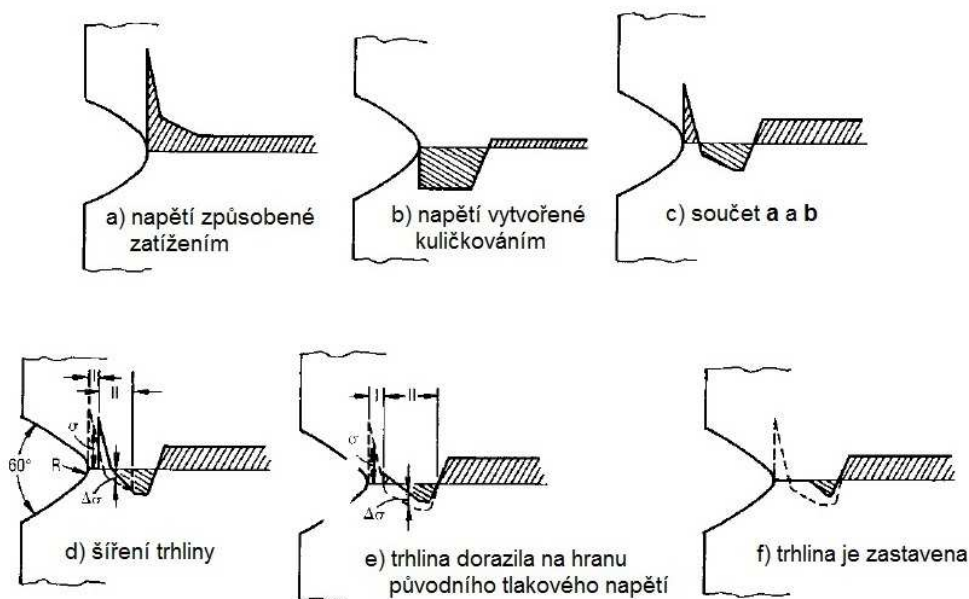
- *iniciace trhliny* na povrchu, ve kterém je buď zbytkové tahové napětí (pravděpodobně po obrábění) nebo vnesené tahové napětí (působením vnějších sil, jako např. při záběru ozubení)
- *růst trhliny* v součásti (např. zubu)
- *lom součásti* v důsledku nedostatečného průřezu, který již dále není schopen unést potřebné zatížení.

Růst trhliny závisí na napěťových podmínkách kolem hrotu trhliny. Z výše uvedeného vyplývá, že se **trhlina nebude šířit do oblasti s tlakovým napětím**. Zastavení šíření trhliny pomocí zbytkového tlakového napětí je založeno na následujících faktorech:

- trhlina neporoste, dokud ji tahové síly nerozevřou v blízkosti hrotu
- hrot trhliny se nerozevře, dokud na něj působí tlakové síly.

Na obr. 1.6.1.1.1 je znázorněn princip zastavení trhliny v součásti s vrubem pomocí vytvořeného tlakového napětí:

- a) rozložení napětí v nekuličkované součásti při zatížení (tahové napětí)
- b) rozložení napětí v součásti po kuličkování (zbytkové tlakové napětí)
- c) rozložení napětí v kuličkované součásti při zatížení
- d) rozložení napětí v kuličkované součásti při zatížení po iniciaci trhliny a jejím částečném rozšíření do oblasti tahového napětí (čárkovaná čára znázorňuje původní rozložení z obrázku c)
- e) trhlina dorazila do oblasti (I), kde se napětí v neporušené zatížené součásti změnilo z tahového na tlakové
- f) trhlina je zastavena díky absenci tahového napětí. [14]

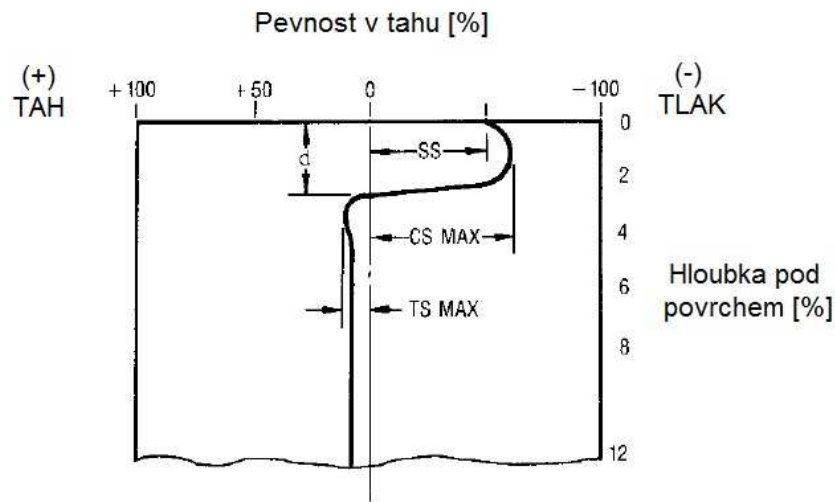


Obr.1.6.1.1.1 : Zastavení šíření trhliny pomocí zbytkového tlakového napětí [14]

Na obr. 1.6.1.1.2 je znázorněn typický průběh zbytkového tlakového napětí, jak se mění s hloubkou. Má čtyři důležité charakteristiky:

- 1) **SS** – Surface Stress, tj. povrchové napětí. Měřeno na povrchu součásti.
- 2) **CS_{max}** – Maximum Compressive Stress, tj. maximální tlakové napětí. Běžně je nejvyšší těsně pod povrchem.
- 3) **d** – Depth, tj. hloubka vrstvy tlakového napětí. Bod, ve kterém tlakové napětí přechází přes neutrální osu a stává se tahovým.

- 4) **TS_{max}** – Maximum Tensile Stress, tj. maximální tahové napětí. Kompenzující tahové napětí v jádře materiálu vyrovnává povrchovou vrstvu tlakového napětí, takže součást zůstává v rovnováze. TS_{max} nesmí nabýt takových hodnot, aby způsobilo vnitřní vady v materiálu.



Obr.1.6.1.1.2 : Příklad profilu zbytkového napětí vytvořeného kuličkováním [8], [14]

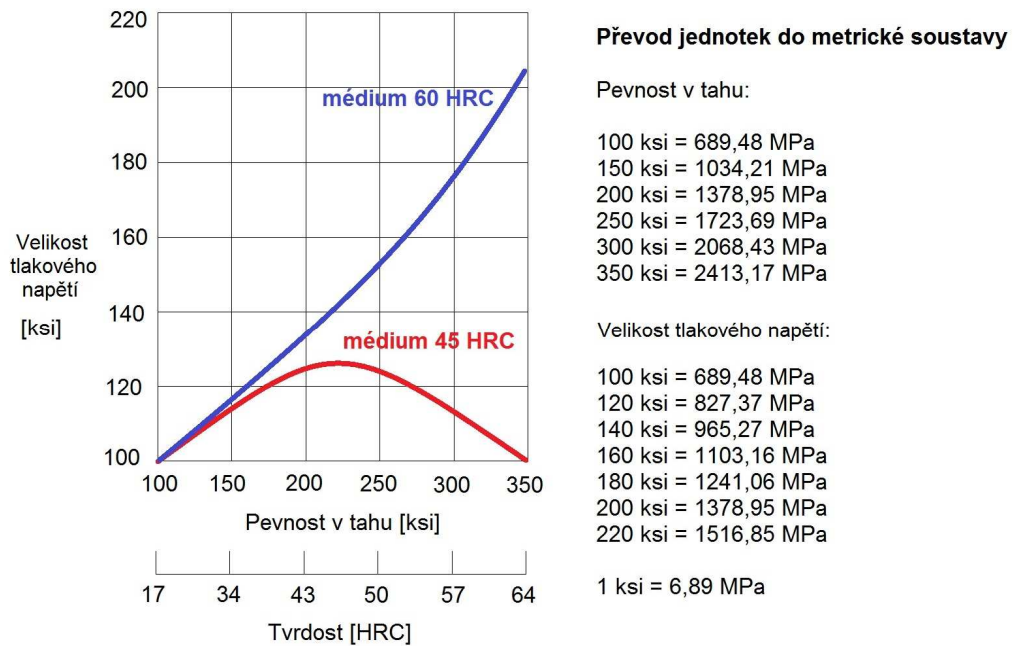
Pozn.: **Zbytková napětí** jsou napětí, která zůstávají v nezátížené součásti po skončení všech výrobních operací. Tato zbytková napětí mohou být tahová i tlaková. Např. svařovaný spoj bude obsahovat velká zbytková tahová napětí v tepelně ovlivněné oblasti. Oproti tomu povrch indukčně kalených součástí může obsahovat zbytková tlaková napětí atd. [14]

1.6.1.2 Velikost tlakového napětí, hloubka tlakové vrstvy

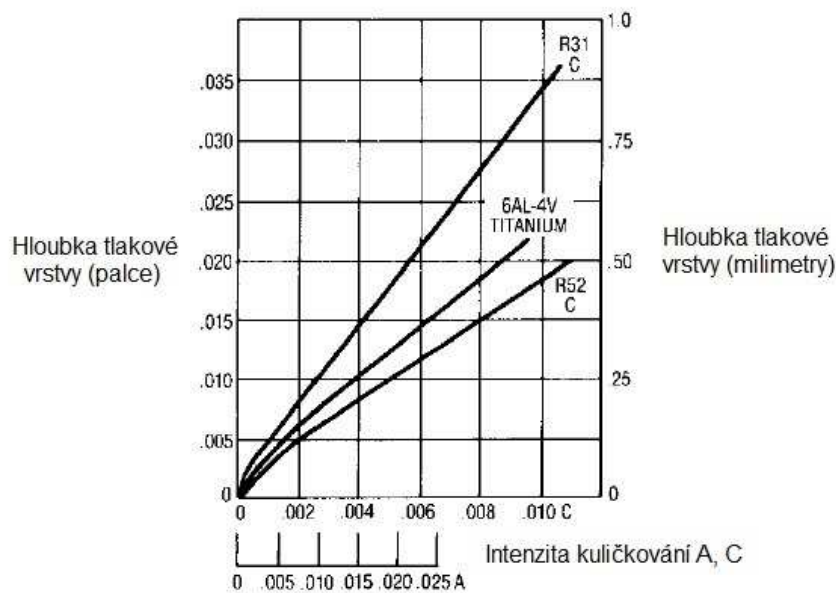
Maximální hodnota vytvořeného zbytkového tlakového napětí C_{smax} je často označována jako **velikost tlakového napětí** (v orig. magnitude). Změny parametrů v procesu kuličkování mají pouze menší vliv na tuto veličinu, a to jen pokud má použité médium minimálně stejnou nebo větší tvrdost než kuličkovaný materiál. Maximální hodnota zbytkového tlakového napětí je primárně **funkcí materiálu samotného a dosahuje hodnoty přibližně 50-60% pevnosti v tahu**. Vztah mezi velikostí tlakového napětí a pevností v tahu je znázorněn na obr. 1.6.1.2.1. Pro dosažení této závislosti je nutno použít média s tvrdostí minimálně 45 HRC. [8], [14]

Hloubka tlakové vrstvy je naopak především **funkcí intenzity kuličkování a v menší míře tvrdosti materiálu**. (Intenzita je mírou kinetické energie vnesené do materiálu. Kinetická energie je funkcí součinu hmoty a rychlosti média.) Při dané intenzitě je **hloubka tlakové vrstvy větší u materiálů s nižší tvrdostí a naopak**. Hloubka tlakové vrstvy je kritickou veličinou, neboť **nesmí přesáhnout 10% tloušťky materiálu**. Obr. 1.6.1.2.1 znázorňuje vztah mezi hloubkou tlakové vrstvy a intenzitou kuličkování pro tři materiály – ocel s tvrdostí HRC 31, ocel s tvrdostí HRC 52 a slitinu titanu Ti-Al6-V4. (Hloubky pro oceli s jinými tvrdostmi mohou být interpolovány.) [8]

Pokud je kuličkovaná součást zatížena vnějšími silami, přičtené tahové napětí od zatížení sníží velikost tlakového napětí od kuličkování (viz např. obr. 1.6.1.1.1). Toto tlakové napětí bude zachováno, pokud zatížení součásti nepřekročí 40-50% pevnosti v tahu materiálu nebo bude pod mezí pružnosti či mezí kluzu. [8]



Obr.1.6.1.2.1: Velikost tlakového napětí v porovnání s pevností v tahu ocelí. [8], [15]



Obr. 1.6.1.2.2: Hloubka tlakové vrstvy v závislosti na intenzitě tryskání pro různé tvrdosti materiálů. [14]

1.6.1.3 Kontrola procesu

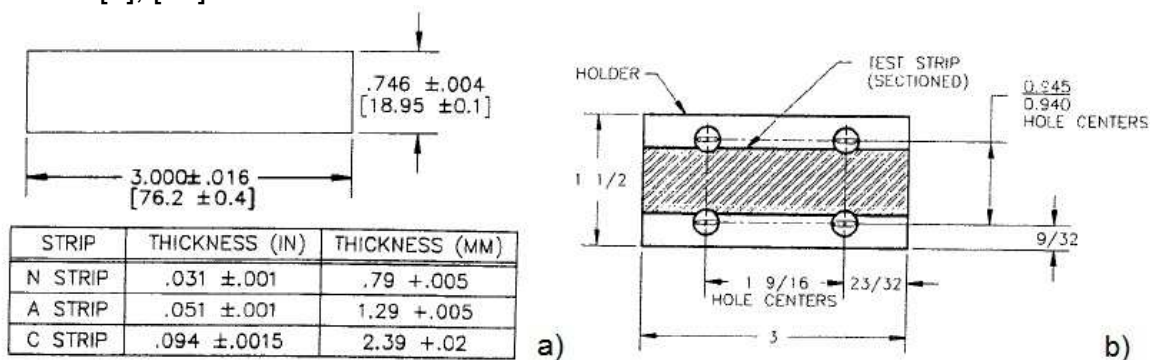
Abychom dosáhli všech výhod, které kuličkování přináší, je potřeba dodržet přísnou kontrolu procesu. To zahrnuje:

- metodu stanovení intenzity kuličkování
- systém na zachování integrity média
- metodu kontroly pokrytí kuličkováných ploch
- pokud možno využití automatizovaného nebo počítačově řízeného vybavení.

Třemi klíči k úspěšnému procesu zpevňování povrchu kuličkováním jsou schopnost **stanovit a udržet vhodnou intenzitu, zachovat integritu média a správně posoudit pokrytí kuličkované plochy.** [8]

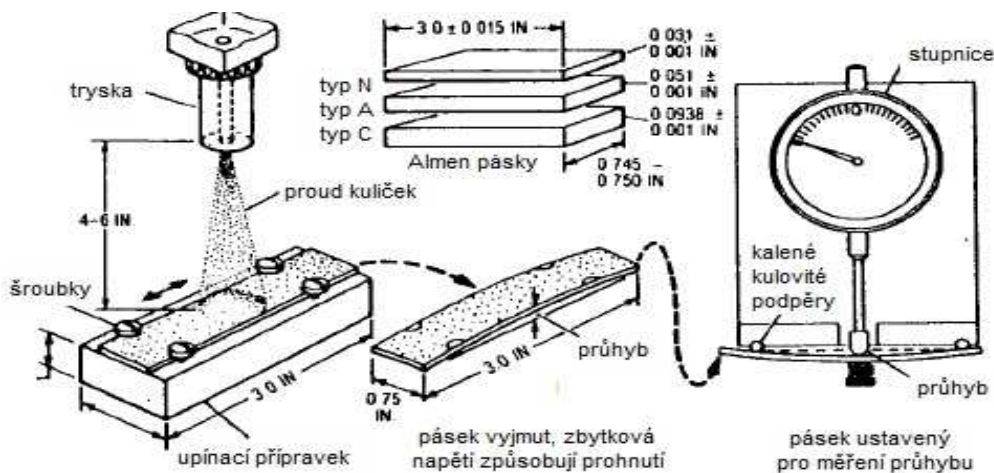
Intenzita

Intenzita kuličkování je měřena pomocí **Almenových pásků.** Existují jich **3 typy: N, A a C,** které se liší tloušťkou (viz obr. 1.6.1.3.1). Používají se pro **stanovení rozdílných rozsahů intenzit.** Jsou vyrobeny z kalené a popuštěné pružinové oceli SAE 1070 (0,65-0,7%C, 0,07-0,6%Si, 0,6-0,9%Mn, 0,03%P, 0,05%S; Rm=650-680 MPa, Re=350-550 MPa, 44-50 HRC). Jsou používány také ke kalibraci kuličkovacího zařízení. [8], [16]

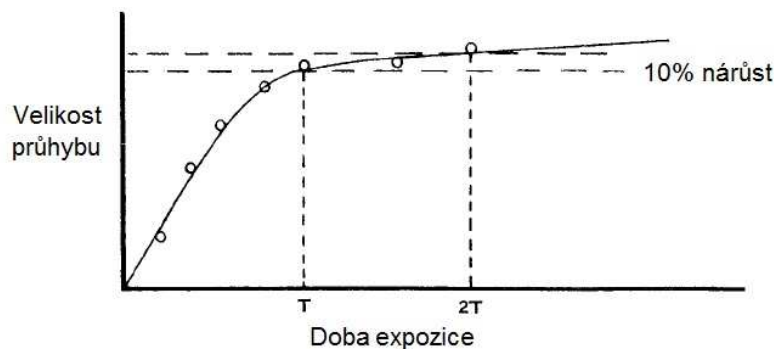


Obr. 1.6.1.3.1: Stanovení intenzity tryskání – a) typy Almenových pásků, b) upínací přípravek [14]

Pro každou kalibraci je třeba použít několik pásků dané tloušťky (N, A nebo C). Ty jsou připevněny na upínací přípravek (Almen block) a okuličkovány s rozdílnou časovou výdrží. Když je pásek vyjmut z přípravku, prohne se směrem, kde je kuličkováný povrch. Průhyb každého pásku se pak měří pomocí speciálního úchylkoměru (Almen gage). Čím déle byl pásek vystaven proudu kuliček, tím větší bude jeho prohnutí. Z hodnot průhybu pro danou dobu expozice je usuzováno na příslušnou intenzitu. Pokud byl např. pásek A vystaven kuličkám po takovou dobu, že vznikl průhyb 0,015 palců (0,38 mm), intenzita je označována jako 0,015A. Hodnoty naměřené na páscích jsou využity k sestavení křivky, která vyjadřuje závislost velikosti průhybu Almenova pásku na době expozice – viz obr. 1.6.1.3.3. [8], [14]

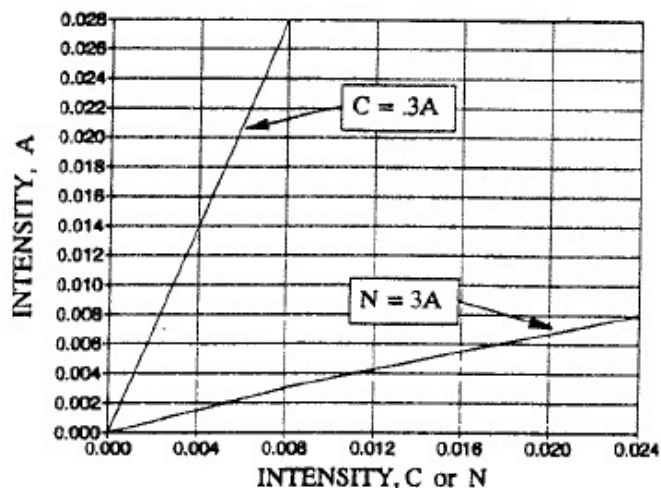


Obr.1.6.1.3.2: Schema kalibrace měření intenzity pomocí Almen pásků. [14]



Obr. 1.6.1.3.3: Závislost velikosti průhybu Almen pásku na době expozice. [14]

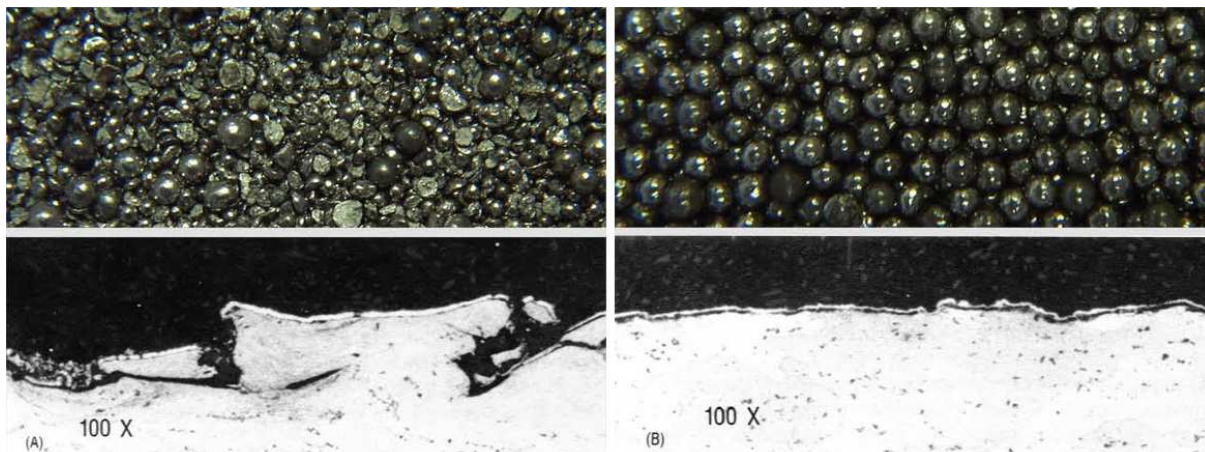
Pro **konkrétní nastavení stroje** je oblastí s ideální dobou expozice pro danou intenzitu začátek nasycení křivky – viz rozsah T-2T. Tento rozsah je definován jako část křivky, kde je nárůst průhybu menší než 10% při dvojnásobné době expozice. Saturační křivka je důležitou součástí kontroly, neboť použití vhodné intenzity je základem úspěchu při zvyšování únavové odolnosti součástí. [8]



Obr. 1.6.1.3.4: Vztah mezi jednotlivými typy intenzit (číselné údaje v palcích). [14]

Udržení integrity média

Druhou kontrolou procesu kuličkování je udržení velikosti a tvaru kulovitého, neporézního kovového tryskacího média. Kontrola tvaru a velikosti média zajišťuje vznik tlakové vrstvy v povrchu se stejnou hloubkou a velikostí tlakového napětí. Když naráží kov na kov, „něco se vždy poškodí“. V případě kuličkování je to médium, které se buď rozbije, nebo degeneruje do nepřijatelného tvaru a velikosti. Pokud by bylo v tomto stavu dále použito ke kuličkování, na povrchu kuličkované součásti by se díky vrypům od ostrých částic mohly vytvářet koncentrátoři napětí. Navíc, zmenšila by se hmota média a úměrně s ní i intenzita tryskání. Je tedy **nutno v pravidelných intervalech částice kontrolovat**. To je zajištěno pomocí tzv. „klasifikátoru“. Ten využívá nejprve řadu sít, umístěných pod násypkou a separuje nesprávné velikosti částic. Po roztřídění podle velikosti je médium dávkováno do spirály. Částice správného kulovitého tvaru se cestou dolů pohybují po vnějším okraji spirály a přepadají na další spirálu, která je umístěna níže. Takto je médium tříděno i dle tvaru. [8]



Obr.1.6.1.3.5: Vzhled média a povrchu součásti a) bez kontroly, b) při správné kontrole. [17]

Pokrytí

Povrch součásti po kuličkování by měl být kompletně pokryt „dolíčky“, neměly by na něm být žádné oblasti bez indentací. Takové oblasti jsou totiž obklopeny tlakovým napětím, zatímco samy vykazují napětí tahové. [8]

V případě tvrdších povrchů je „důlkování“ jen obtížně identifikovatelné pouhým okem. V takovém případě lze ke stanovení pokrytí použít dvě techniky – vizuální kontrolu pomocí zařízení se zvětšením min. 10x (př. zvětšovací sklo, makroskop) nebo kontrolu pomocí kapaliny Dyescan, kterou se povrch pokryje ještě před kuličkováním. Tato kapalina se v normálním světle na povrchu jen leskne, ve tmě však světélkuje a může být odstraněna pouze přímým působením média. Součásti natřené touto kapalinou se tedy po kuličkování kontrolují ve tmě a oblasti, které by nebyly správně pokryty kuličkováním, budou svítit. Touto metodou se většinou kontroluje pouze 1. kus a vybrané kusy dle statistické přejímky. [8]

Pokud by se při některé kontrole zjistilo nedokonalé pokrytí (méně než 100% je nepřijatelných), je většinou řešením prodloužení časového intervalu kuličkování. [8]

Doplňující kontroly

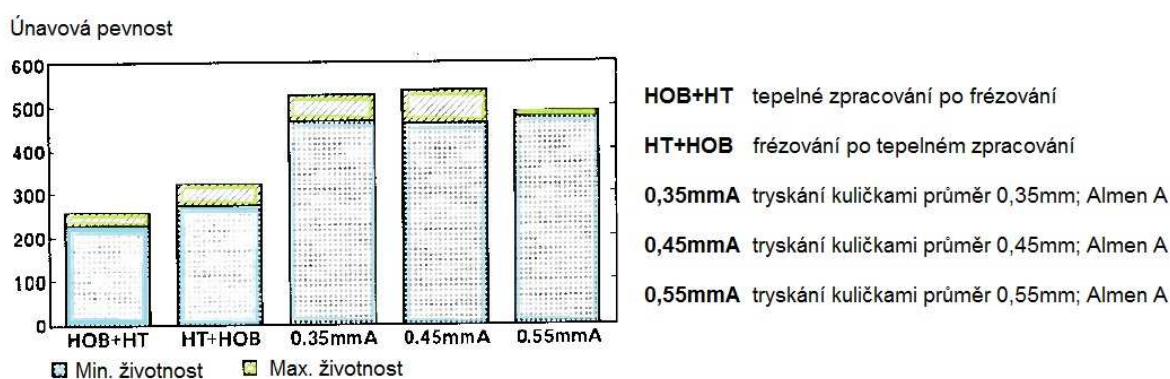
V současné době je trendem automatizace procesu kuličkování a využití počítačového řízení. V paměti počítače je možno uložit data o parametrech kuličkování mnoha součástí a tedy zvýšit efektivitu procesu nejen v sériové výrobě. Současně jsou využívány senzory monitorující např. tok média, rotaci součásti a další kritické oblasti. Jakékoli porušení monitorovaných bodů je tak zjištěno ihned a proces je automaticky zastaven. Tím se ještě zvyšuje jeho přesnost. [8]

1.6.1.4 Kuličkování ADI

V roce 1971 spustila centrální slévárenská divize fy GMC množství laboratorních a provozních testů, které demonstrovaly využitelnost převodu z izotermicky kalené tvárné litiny. Článek SAE International (#820696, Neil Lottridge a Robert Grindahl) shrnul výsledky testování provedené divizí Pontiac fy GMC z let 1971-1977 na hypoidních kolech pro zadní nápravu, vyrobených z tvárné litiny.

Inženýři Pontiacu zjistili, že – narozdíl od oceli – kalení tvárné litiny má za následek jen malá zbytková tahová napětí na povrchu materiálu. Jelikož by ale kola z ADI neměla únavovou odolnost cementované oceli, byla v materiálu prostřednictvím kuličkování vytvořena zbytková tlaková napětí. Výhody ADI s kuličkováním měly za následek produkci převodů s dobrou únavovou životností, hmotností nižší o 10%, větší torzní pevnosti, a, díky grafitu, lepšími kluznými vlastnostmi a nižší hlučností. Na obr.1.6.1.4.1 je pro příklad znázorněno, jak kuličkování podstatně zvyšuje únavovou pevnost ozubení z ADI. [8], [14]

Kromě zlepšených únavových vlastností, ADI při zpevňování také zlepšuje svou odolnost proti opotřebení. To je důsledek **tváření zastudena**, které **iniciuje přeměnu zbytkového austenitu na martenzit**. [8]



Obr.1.6.1.4.1: Vliv změn výrobního procesu na ohybovou únavovou pevnost ozubení z ADI (K9805). Měřeno po 10 zátěžných cyklech. [14]

Mimo převodů patří mezi součásti, pro něž má kuličkování jednoznačný přínos, např. lopatky turbín, ojnice, klikové hřídele, převody, hřídele a nápravy, pružiny, torzní tyče aj. Kromě ADI patří mezi materiály vhodné k povrchovému zpevňování kuličkováním např. vysokopevnostní oceli, slitiny hliníku, produkty práškové metalurgie či slitiny titanu. [14]

1.6.1.6 Účinek kuličkování na oduhličené povrchy

Oduhličení je jedním z nejnebezpečnějších nežádoucích jevů, které se mohou naskytnout při nedodržení výrobní technologie ADI/AGI/AVGI. Oduhličení je definováno jako úbytek uhlíku z povrchu slitin železa jako důsledek ohřevu v prostředí, které s uhlíkem na povrchu reaguje. Je prokázáno, že **oduhličení může snížit únavovou pevnost** v řádu desítek procent. Je obecně přijímáno, že oduhličení je povrchový jev, u kterého příliš nezáleží na hloubce vrstvy. Vrstva oduhličení např. 0,1 mm může napáchat stejné škody na únavové pevnosti jako vrstva oduhličení 1 mm. Silné oduhličení však může indukovat výrazné zbytkové tahové napětí v povrchu součásti. **Kuličkování se ukázalo být efektivním v obnovení většiny, když ne veškeré únavové pevnosti ztracené při oduhličení.** Vzhledem k tomu, že oduhličená vrstva, byť je měkčí, není snadno detekovatelná při velkém množství vyráběných součástí, může být **kuličkování zárukou integrity povrchu součástí v případech, kdy je oduhličení očekáváno.** [14]

1.6.2 Využití RTG difrakce při zkoumání kuličkových povrchů izotermicky kalených litin

Almenovy pásky, které se používají k optimalizaci a později ke kontrole parametru kuličkování, jsou velmi nepřímou metodou měření. Jelikož se jedná o proužky kovu často jen vzdáleně podobné chemickým složením a mechanickými vlastnostmi součástí, která je právě kuličkována, téměř nikdy nejsou všechny důležité podmínky procesu shodné s podmínkami reálné součásti. V důsledku toho se velikost zbytkových napětí a hloubka tlakové vrstvy po kuličkování mohou výrazně lišit od hodnot požadovaných konstruktérem. Jedinou spolehlivou cestou jak ověřit, že zpracování přineslo kýžený efekt je skutečně změřit napětí v kuličkových součástech. Konvenčními jsou experimenty, využívající **difrakci RTG záření (XRD)** na krystalové mřížce. V případě kuličkových povrchů se využívá před. metoda ke stanovení křivek rozložení napjatosti, z nichž bude patrná velikost zbytkového tlakového napětí (viz obr.1.6.3.4). Jedná se o dobře zavedenou kvantitativní metodu, která poskytuje přesné hodnoty napětí - tzv. **rentgenografické určení makroskopických zbytkových napětí**. Její dosah je ovšem limitován hloubkou několika mikrometrů. Jelikož v případě kuličkových součástí se oblast maximální hodnoty zbytkového tlakového napětí často pohybuje nikoli na povrchu ale těsně pod povrchem (viz obr.1.6.1.1.2), není tato metoda měření pro praktické využití vhodná. Proměření napětí do hloubky pomocí XRD vyžaduje postupné elektrochemické odleptávání vrstviček materiálu a opakovaná měření. Takový postup je možný pro laboratorní hodnocení na vybraných vzorcích, ale není využitelný pro 100% kontrolu součástí v provozu (mj. už by se ani nejednalo o nedestruktivní metodu). [8], [21]

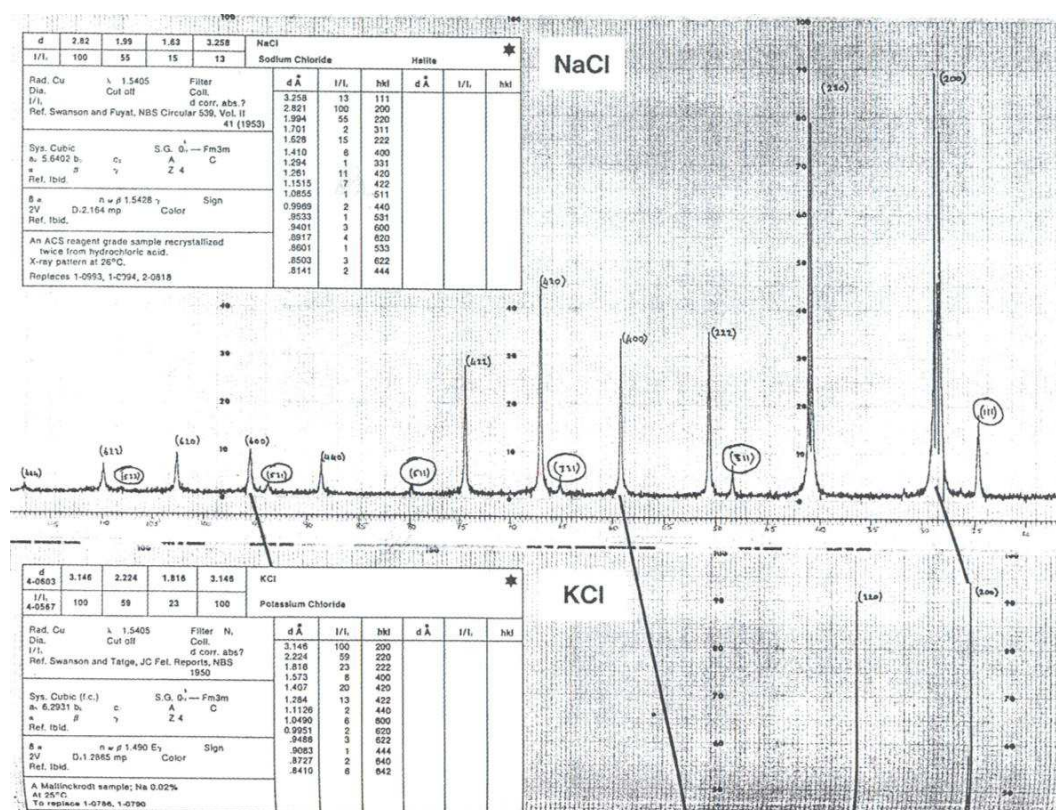
V případě kontroly kuličkových součástí z ADI/AGI/AVGI mají z metod RTG difrakce význam také **kvalitativní a kvantitativní fázová analýza**, jímž lze **ověřit plastickou deformací iniciovanou přeměnu Az na M** u těchto litin (tj. přeměnu Fe_γ na Fe_α). Tzv. difrakční spektrum (množina hodnot vzdáleností reflektujících atomových rovin a relativních intenzit odpovídajících difrakčních linií) je totiž jednoznačnou charakteristikou daného stavu polykrystalického materiálu. Neexistují dvě látky s identickými difrakčními diagramy. Máme-li směs různých fází, pak každá z nich dává nezávisle na ostatních svůj vlastní soubor mezirovinných vzdáleností a relativních intenzit. Vzájemná odlišnost (jedinečnost) struktur tak umožňuje identifikovat krystalické vzorky na základě difrakčních diagramů. K hlavním přednostem RTG difrakční fázové analýzy patří její nedestruktivní charakter, spotřeba minimálního množství materiálu na přípravu vzorků a právě rozlišitelnost polymorfních modifikací téže látky. [6], [11], [21], [22]

1.6.2.1 Rentgenografická kvalitativní fázová analýza

Předmětem kvalitativní difrakční fázové analýzy je **určení fázového složení** zkoumaného vzorku, tj. **registrace a identifikace všech přítomných fází**. [6], [11]

Principem kvalitativní difrakční fázové analýzy je **porovnání difrakčních spekter zkoumané látky s etalonovými diagramy**. Hodnoty mezirovinných vzdáleností i relativních intenzit různých krystalických fází jsou obsaženy v řadě tabulek a databází (ASTM, JCPDS, ICDD). Jak vyplývá např. z obr. 1.6.2.1.1., kromě intenzit a mezirovinných vzdáleností jsou zde uvedeny i podmínky, za nichž byl difrakční diagram získán, dále strukturně-krystalografická data (soustava, prostorová

grupa, délky hran základní buňky, meziosé úhly, počet atomů nebo molekul v buňce, teoretická hustota), optické konstanty a další fyzikální vlastnosti látky (barva, tvrdost, bod tání). Databáze jsou neustále aktualizovány o nové poznatky. K fázové identifikaci se používají tři nejintenzivnější linie analyzované fáze. [6], [11], [25]



Obr.1.6.2.1.1: Záznam difraktometrické analýzy směsi fází NaCl a KCl z databáze ASTM [25]

1.6.2.2 Rentgenografická kvantitativní fázová analýza

Kvantitativní difrakční fázová analýza poskytuje informace o procentuálním zastoupení jednotlivých fází.

Je založena na vztahu mezi integrální intenzitou difrakčních spekter jednotlivých fází a obsahem fází ve směsi. **Intenzita linií dané složky závisí přímo na objemovém podílu krystalků této složky v celkovém ozářeném objemu vzorku.** Podle způsobu, kterým je tato závislost určována (tj. podle způsobu kalibrace) se rozlišují metody kvantitativní difrakční fázové analýzy, při nichž se používá *vnější standard* (dvojí měření – vzorku a známého preparátu, který se zvolil jako standardní), metody s *vnitřním standardem* (přimíchán ve vzorku ve známé koncentraci) a metody *bezstandardové* (využívají tzv. intenzitní faktory). [6], [11], [25]

Intenzita difrakcí závisí ovšem nejen na koncentraci příslušné fáze, ale i na struktuře její elementární buňky, na parametrech experimentálního uspořádání, tvaru, rozměrech a charakteru povrchu vzorku a na reálné krystalové struktuře. Právě ta představuje při kvantitativní analýze hlavní zdroj chyb – např. textura (přednostní orientace) výrazně zkresluje výsledky. Kvantitativní fázová analýza dává nejspolehlivější informace v případě, že se jako vzorky použijí prášky s velmi jemnými a dezorientovanými krystalky.

Splnění těchto předpokladů je ve skutečnosti velmi obtížné. Vliv reálné struktury lze však úspěšně redukovat vhodnou přípravou vzorku (izotropie, jemnozrnnost) a tím, že se proměruje co největší počet difrakčních linií každé fáze přítomné ve vzorku. Podle toho, jak dokonale je provedena korekce, je možné dosáhnout **absolutní chyby stanovení mezi 1-10%**. [6], [11], [25]

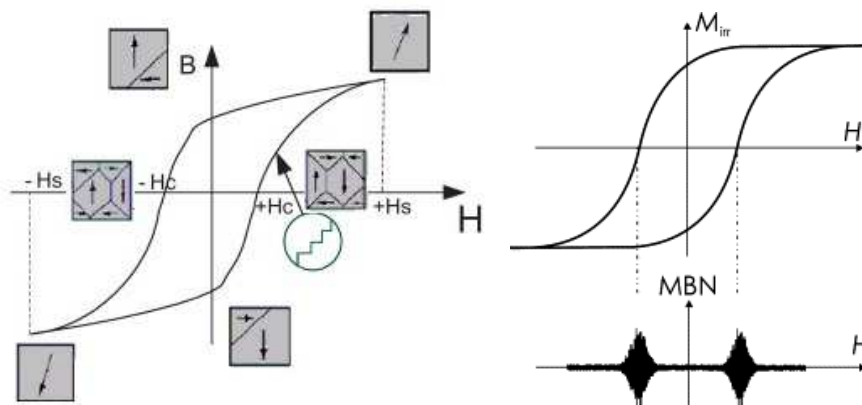
Průměrná **minimální koncentrace složky**, která může být difrakčními metodami ještě analyzována, činí **procenta**. Přesnost stanovení obsahu jednotlivých fází závisí především na změření integrální intenzity difrakčních linií. Je zřejmé, že relativní chyba difrakční analýzy se bude u dané látky měnit v závislosti na její koncentraci – intenzivnější linie se změří s větší přesností než linie slabé. [6], [11]

Kromě výše uvedeného (vliv reál. struktury, min. koncentrace) je aplikace kvantitativní fázové analýzy omezena ještě několika důležitými parametry. Analyzovat je možné pouze vzorky, jejichž krystalky mají střední velikost od 0,1 do 10 μm , nebo látky mezomorfní (parakrystalické). Vzhledem k omezené hloubce vnikání RTG záření používaného k difrakční analýze se získaná informace o fázovém složení vztahuje pouze k tenké povrchové vrstvě silné několik jednotek nebo desítek mikronů. Získaný údaj se tedy může lišit od průměrného fázového složení vzorku. [6]

1.6.3 Využití Barkhausenova šumu pro nedestruktivní kontrolu kuličkových součástí z izotermicky kalených litin

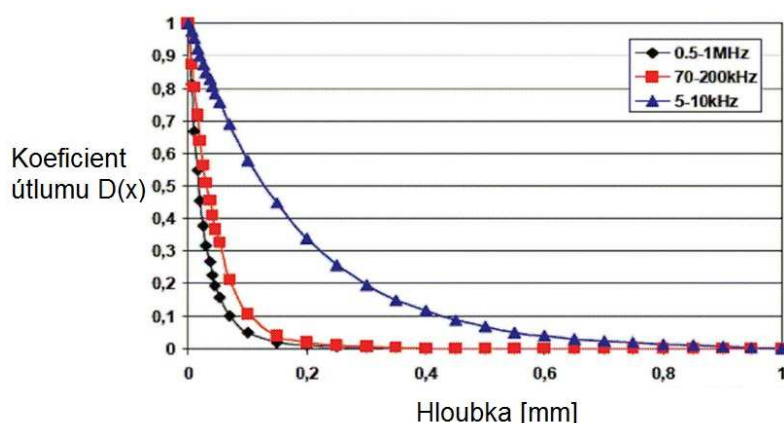
Další z metod, jež je používána jako jedna z možných pro kontrolu zpevněné povrchové vrstvy po kuličkování je metoda založená na analýze **Barkhausenova šumu (BNA)** u feromagnetických materiálů. Jedná se o nedestruktivní metodu hodnocení integrity povrchu z hlediska zbytkových napětí, tvrdosti vzorků a strukturních a fázových změn, která může překlenout nevýhody a omezení RTG difrakce. Tato měřicí technika je již po mnoho let široce užívána v automobilovém a leteckém průmyslu na nedestruktivní kontrolu povrchu mnoha druhů součástí (vačkových hřídelí, ozubených kol, ložisek...) po tepelném zpracování, soustružení, broušení nebo leštění. Je vhodná pro statickou i dynamickou kontrolu. **Měřenou veličinou** je tzv. **magnetoelastický parametr MP**, který odpovídá amplitudě Barkhausenova šumu. [20], [21]

Barkhausenův šum je jev související s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetika, kdy vnější magnetické pole způsobuje posuv doménových stěn. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně stěny se musí zvětšit a doména na druhé straně se smrští. Výsledkem je pak změna v celkové magnetizaci vzorku. Je-li v blízkosti vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, umístěna cívka z vodivého drátu, související změna magnetizace vzorku indukuje v cívkě elektrický puls. Souhrnem všech elektrických pulsů vzniká signál zvaný Barkhausenův šum. Na hysterezní křivce, která charakterizuje proces magnetizace, se projevuje tzv. Barkhausenovými skoky (viz obr.1.7.3.1). [20], [21]



Obr.1.6.3.1: Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu. Vlevo pohyb domén v závislosti na vnější magnetizaci, vpravo signál Barkhausenova šumu. [24]

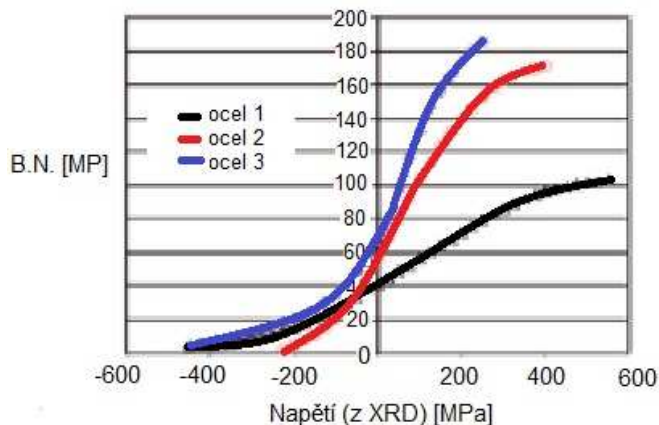
Barkhausenův šum má pro většinu materiálů frekvenční spektrum začínající na magnetizačním kmitočtu (větš. stovky Hz) a končící přibližně za 1 MHz. **Signál je exponenciálně tlumen** v závislosti na vzdálenosti, kterou projde uvnitř materiálu. Primární příčinou tlumení jsou **vířivé proudy**, které jsou indukovány při šíření signálu vznikajícího pohybem domén. Útlum **určuje hloubku**, ze které lze ještě informaci získat a vyjadřuje se koeficientem útlumu $D(x)$, kde x je hloubka v mm (odvození viz [10], znázornění viz obr.1.6.3.2). Hlavními faktory, které ovlivňují tuto hloubku tedy jsou frekvenční rozsah generovaného signálu a vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu. Při běžných aplikacích se **měřicí hloubka** pohybuje **mezi 0,01** (tvrdé materiály) **a 1,5 mm** (měkké materiály). U kalených součástí se většinou pohybuje do 100 – 200 μm . Jelikož je tato hloubka cca 10-100x větší, než hloubka dosahovaná pomocí XRD, je metoda BNA schopna zaznamenat podpovrchové napětí bez nutnosti odstranění povrchové vrstvy. [10], [20], [21]



Obr.1.6.3.2: Útlum signálu jako funkce hloubky [21]

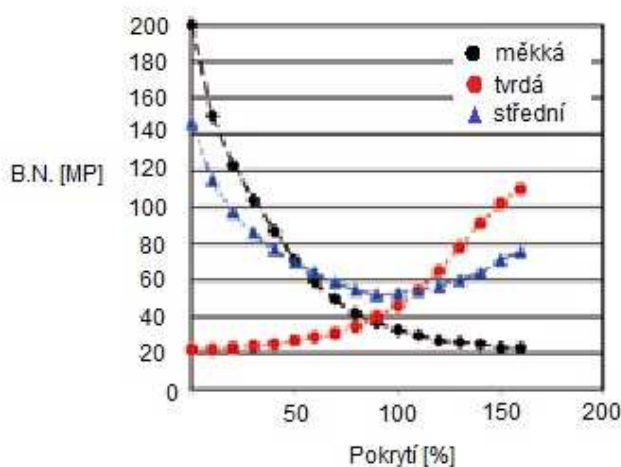
Posouzení zbytkového napětí metodou BNA je založeno na **závislosti mezi magnetickými vlastnostmi materiálu a pružnými napětími**. Přítomnost a rozložení elastických napětí ovlivňují cestu, kterou se domény ubírají za cílem snadné orientace ve směru magnetizace. Tento jev, při kterém elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, se nazývá **magnetoelastická interakce**. Na obr.1.6.3.3. je příklad měření Barkhausenova šumu – kalibrační křivka vyjadřující závislost amplitudy Barkhausenova šumu na napětí.

Úroveň Barkhausenova šumu systematicky roste s klesajícím tlakovým napětím a rostoucím napětím tahovým za předpokladu, že napětí je v rámci meze pružnosti materiálu. Pokud je materiál deformován tak, že se změní jeho tvrdost, změní se i jeho mez pružnosti a tedy i odezva Barkhausenova šumu na napětí – **intenzita signálu klesá s rostoucí tvrdostí.** Je to důsledkem blokace pohybu doménových stěn na mřížkové úrovni v zásadě stejnými překážkami a defekty, jako pohybu dislokací při plastické deformaci. [10], [20], [21], [26]



Obr. 1.6.3.3: Kalibrační závislost amplitudy Barkhausenova šumu na napětí pro různé typy ocelí. [21]

Bylo prokázáno, že **odezva Barkhausenova šumu na kuličkování závisí na materiálu. U relativně měkkých ocelí úroveň Barkhausenova šumu spojitě klesá s rostoucí intenzitou kuličkování, u velmi tvrdých (př. martenzitických) ocelí roste** (viz obr.1.6.3.4, intenzita kuličkování, která se pro různě tvrdé materiály vyjadřuje různými stupni N, A či C, je zde jednotně zastoupena hustotou pokrytí kuličkované plochy). V prvním případě odezva odráží narůstající tlaková napětí a deformační zpevnění při kuličkování, druhý případ může být vysvětlen mikrostrukturními změnami a deformačním změkčením v povrchových vrstvách materiálu. V určitém rozsahu středních hodnot tvrdosti kuličkovanych ocelí je možná kombinovaná odezva ve tvaru písmene U. [10], [20], [21]

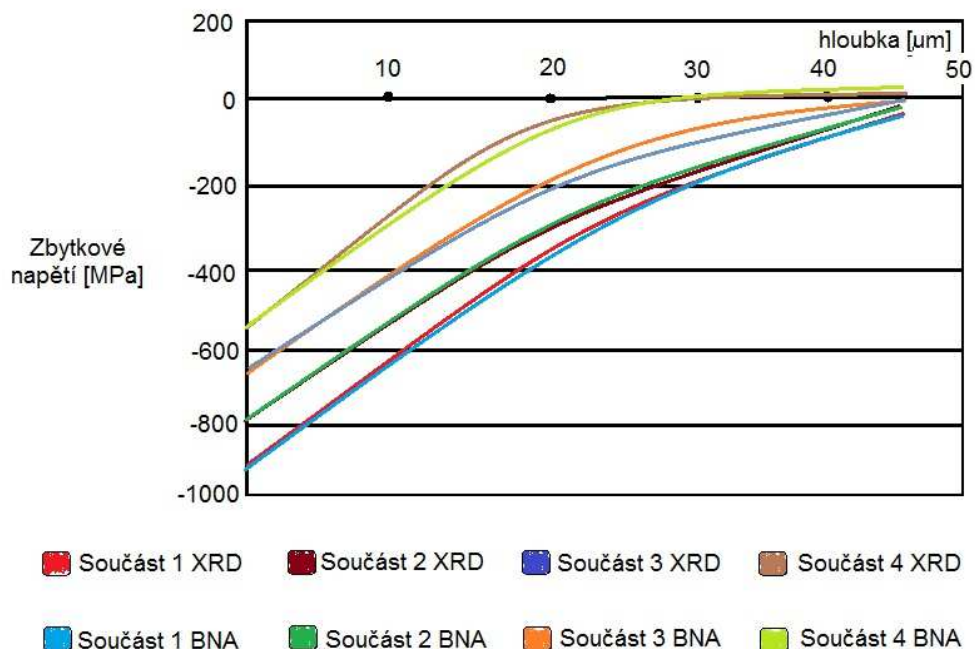


Obr. 1.6.3.4: Závislost amplitudy Barkhausenova šumu na intenzitě kuličkování (vyj. pokrytím) pro oceli s různou tvrdostí. [21]

Průmyslové aplikace metody BNA pro hodnocení zbytkových napětí lze rozdělit do dvou skupin:

- 1) **Kvalitativní kontrola**, např. třídění kuličkovaných/nekuličkovaných součástí, kontrola pokrytí kuličkováním aj. Tento druh kontroly se běžně využívá v sériové výrobě (před. v automobilovém průmyslu), neboť může být snadno automatizován (podmínky pro OK/NOK stavy se stanovují z měření referenčních vzorků).
- 2) **Kvantitativní měření**, např. při optimalizaci procesu kuličkování či při hodnocení zbytkového napětí v povrchu součástí po kuličkování. Tento druh kontroly využívají kupříkladu dodavatelé bezpečnostních komponent pro letecký průmysl, neboť jsou nuceni ověřit a garantovat, že zbytková napětí odpovídají specifikaci. V případě kontroly zbytkového napětí je často požadováno, aby byl profil napětí proměřen do hloubky několika desítek mikronů, což je hloubka za hranicí dosažitelnosti pomocí XRD, má-li se jednat o nedestructivní měření.

Pánové Jacob a Marrone [23] pomocí výsledků z XRD nastavili a posléze zkalibrovali svůj BNA přístroj pro přesná měření napěťových profilů z kuličkování až do hloubky 45 μm . Na obr.1.7.3.5 jsou znázorněny čtyři napěťové profily získané z měření povrchů tryskaných za různých podmínek. Každý ze vzorků byl měřen jak pomocí XRD, tak pomocí BNA. Shoda mezi příslušnými profily ukazuje, že metoda BNA je schopna dodávat kvantitativní informace o procesu kuličkování. [20], [21]



Obr. 1.6.3.5: Hloubkové profily zbytkového napětí měřené difraktometricky a barkhausenovsky [23]