



Integrita povrchu ostří nástroje ze slinutého karbidu

Antonín Kříž¹, Kamil Kolařík¹, Antonín Janoušek¹, Jan Palán¹

¹ ZČU Plzeň, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Česká republika. E-mail: kriz@kmm.zcu.cz

Abstrakt

Článek shrnuje poznatky v oblasti integrity řezné hrany. Autoři tohoto článku v minulosti uvedli celou řadu podobných publikací, proto si tento článek klade za cíl shrnout dosavadní zásadní poznatky a nastínit další směr využití slinutých karbidů. V dnešní době se již tento vývoj neobejde bez zahrnutí zásad integrity ostří. Rozvoj tohoto vědního oboru napomohl nejen popsat, ale i objasnit celou řadu procesů, které se odehrávají jak při výrobě řezných nástrojů, tak i v samotném řezném procesu tj. v aplikaci řezného nástroje. Tyto procesy jsou v článku jak po stránce teoretické, tak i praktické popsány, v závěru jsou uvedeny další směry a experimenty, kterými se budou autoři v nejbližší době zabývat, aby na základě získaných znalostí bylo možné zvýšit užité vlastnosti nástrojů ze slinutých karbidů.

Klíčová slova: integrita povrchu, ostří řezného nástroje, slinuté karbidy, zbytková napětí

1 Úvod

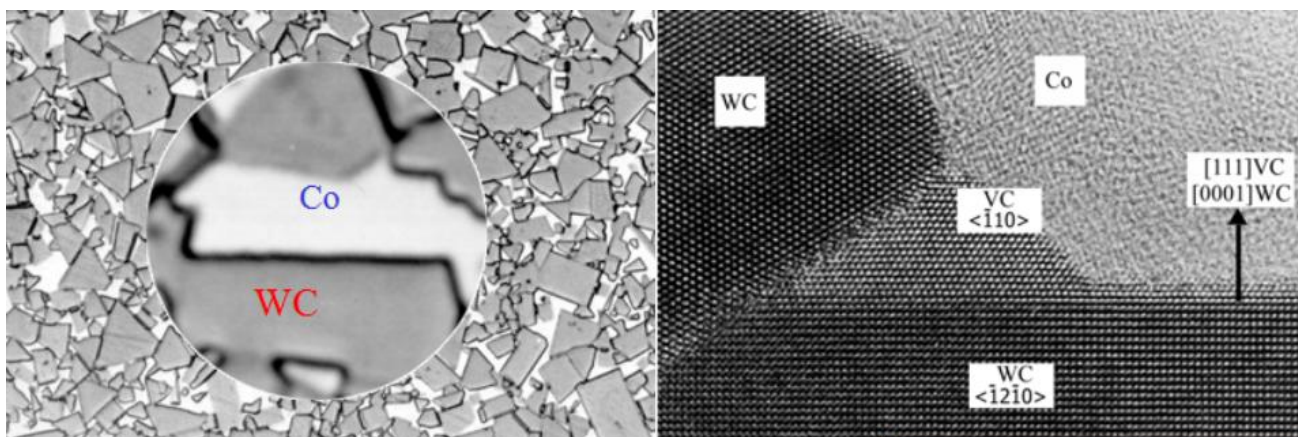
První kroky práškové metalurgie vedly na počátku 20. století k výrobě wolframového žhavicího vlákna. Další vývoj spočíval ve výrobě slinutých karbidů pro průvlaky drátů. Zde již byla použita klasická skladba, tj. karbid wolframu a jako pojivo kobalt. Ve dvacátých letech minulého století se již začaly vyrábět slinuté karbidy dnešního složení. Německá firma KRUPP zahájila průmyslovou výrobu pod názvem WIDIA. Další vývoj směřoval k použití různých druhů karbidů (TiC, NbC, VC) a ke zjemnění struktury zrna [1]. Až do devadesátých let minulého století se slinuté karbidy používaly v aplikaci na řezné nástroje v podobě vyměnitelných břitových destiček popř. destiček pájených na nosné elementy nástrojů. Pak nastal pro aplikaci slinutých karbidů významný zvrat, neboť se začaly vyrábět osové monolitní nástroje ze slinutých karbidů. Geometrie nástroje se zpočátku vybrušovala „do plna“, později (od přelomu století) se začaly využívat i předslinované polotovary blížící se svým tvarem k hotovému nástroji. Významných změn doznaly nejen používané polotovary z hlediska tvaru a velikosti (kanálky pro chlazení), ale také strukturní a chemická skladba a v neposlední řadě také výroba slinutých karbidů. Jako jednoho z hlavních představitelů těchto změn lze jmenovat světově proslulou firmu CERATIZIT.

2 Vliv struktury na vlastnosti slinutých karbidů

Hlavní složkou slinutých karbidů je karbid wolframu (hexagonální mřížka), karbid titanu event. vanadu (mřížka kubická) o tvrdosti 2000 až 3200 HV a kobalt jako pojivo (obr.1). Vzhledem k vysokým požadavkům na tvrdost, odolnost proti opotřebení a pevnost je důležité nejen složení, ale i struktura jednotlivých vzájemnými vlastnostmi odlišných fází. Na příkladu podvojného kompozitu WC-Co je možno si ukázat závislost pevnosti v ohybu jednotlivých chemických složení na volné délce kobaltové fáze l_{Co} . Toto kritérium se používá místo velikosti zrna vzhledem k tomu, že spojovací materiál - pojivo (Co) se nachází jako síťová mezi zrny karbidu wolframu. Při vysokém obsahu pojiva nebo vysoké hodnotě l_{Co} dochází ke značným plastickým deformacím a zpevnění. Nicméně kobaltové pojivo není zdrojem nárůstu vnitřního zbytkového napětí. Ze získaných poznatků vyplývá, že při překročení mezních vlastností, např. při špatně zvolených parametrech broušení, je poškození ve většině případů funkcí karbidu wolframu. Při komplexním posuzování vlastností slinutých karbidů, je třeba počítat i s vlivem pojiva a to jak z hlediska jeho schopnosti plastické deformace a tím i tlumení zbytkových napětí I. druhu [2], tak i s jeho vyčerpáním plastických schopností a následným rozvojem poškození. To opět závisí na volné délce kobaltové fáze (l_{Co}), neboť po vyčerpání plastických schopností kobaltu (zvysujícím se napětím) může dojít k makroskopickému porušení. Se zmenšením obsahu kobaltu se zvětšuje kontakt mezi zrny karbidu wolframu, jež mohou být potenciálními zdroji mikrotrhlin. Velmi tenká kobaltová vrstva (100 až 300 nm) rychle zkréhne, jelikož dislokace v ní mají omezený pohyb a nedochází k zastavování růstu mikrotrhlin. Z uvedených poznatků vyplývá, že vedle obsahu pojiva (kobaltu), bude rozhodující i jeho volná délka (rozdělení kobaltu v materiálu). Dalším důležitým faktorem je schopnost karbidických zrn odolávat nejdříve zbytkovým napětím, později šířící se trhlině. Jak dokumentuje obr. 1, společnost CERATIZIT vyvinula slinuté karbidy, u nichž je zvýšená odolnost proti poškození (šíření trhliny) prostřednictvím složeného karbidu wolframu s karbidem vanadu. Díky této struktuře, která vytváří tzv. „Treppeneffekt“, se zvýší lomová houževnatost až o 30 % [2]. Protože je snahou výrobců snižovat velikost karbidického zrna WC a to především z důvodu vyšší tvrdosti, je jakýkoliv přínos, který zvyšuje houževnatost při zachování vysokých hodnot tvrdosti, pozitivní. Jak dokumentuje obr. 2, obecně platí, že snižováním velikosti karbidických zrn klesá houževnatost. Proto si vybrané druhy slinutých karbidů vyráběných ve společnosti CERATIZIT získaly konkurenční výhodu, neboť mají vedle vysoké tvrdosti (až 1800 HV) i dostatečnou lomovou houževnatost $K_{IC} > 13 \text{ MN/m}^{3/2}$ a to i při velikosti karbidického zrna pod 0,5 μm . Další významnou výhodou jemnozrnných slinutých karbidů, která není v odborných kruzích do-

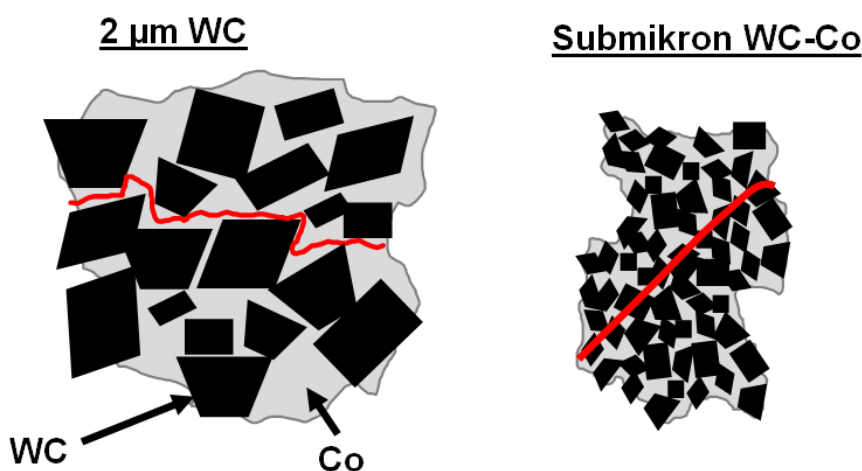
statečně diskutována, je možnost dosažení velmi specifických geometrií nástroje (ostří). Jemnozrná struktura se podstatně lépe brousí, a protože má potlačený sklon ke křehkému poškození, lze vybrousit velmi ostré břity (malý úhel břitu). Výše uvedený princip „Treppeneffekt“ změnil rovněž podmínky využití těchto jemnozrných materiálů. V minulosti byly analyzovány celokarbidové frézy z jemnozrného slinutého karbidu TSM 33 (CERATIZIT), které uspěly v hrubovacím procesu, přestože ostatní frézy vyrobené z konkurenčních jemnozrných karbidů (velikost zrna WC $\sim 0,5 \mu\text{m}$) selhaly[3]. Tento jemnozrný slinutý karbid byl v minulosti využíván i pro speciální nástroje pro obrábění hliníkových slitin. Požadavkem těchto nástrojů nebyla tvrdost (hliníkové slitiny mají tvrdost pod 150 HV), ale dosažení velmi ostrých břitů, u nichž lze speciálními úpravami mikrogeometrie dosáhnout příznivých faktorů zabraňující vzniku nežádoucích nárůstků.

Společnosti CERATIZIT patří také další světové prvenství týkající se technologie výroby slinutých karbidů. Při mletí v attritorech (kulové mlýny) se běžně používá jako kapalné medium aceton, který má výbornou těkavost a odmašťující účinky. Firma CERATIZIT začala na konci devadesátých let využívat vodu se speciálními smáčedly, čímž se nejen dosáhlo požadovaného ekologického přínosu, ale také se zlepšily vlastnosti slinutých karbidů díky lepšímu promíslení a zlepšení vazebných sil mezi pojivem a karbidy. Tuto technologii si nechala firma s úspěchem patentovat.



Obr. 1 – Skladba slinutého karbidu a vytvoření potřebných vazeb mezi tvrdými karbidy a pojícím kovem. Druhý snímek dokumentuje nový trend slinutých karbidů, kdy karbid vanadu zabraňuje snadnému šíření trhliny[3]

Fig. 1 – Structure of cemented carbide and formation of bonds between the hard carbide and the binder metal. The second micrograph illustrates a new trend in cemented carbides where the vanadium carbide impedes the spreading of a crack.



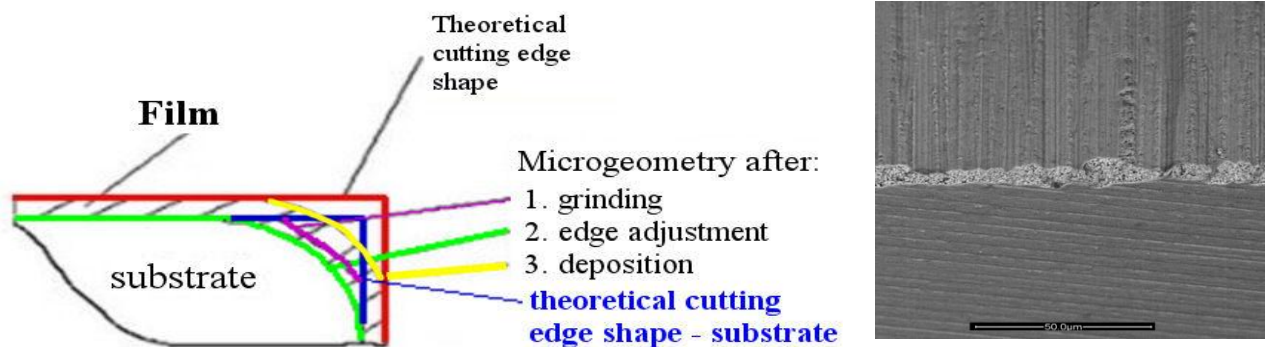
Obr. 2 – Mechanismus šíření trhliny v souvislosti s velikostí karbidického zrna[2]

Fig. 2 – Crack propagation paths depending on the carbide grain size

3 Integrita ostří nástroje

V současné době se začíná do popředí pozornosti prosazovat integrita povrchu. Vedle velmi často diskutované oblasti integrity obrobeneho povrchu, která komplexně zachycuje stav obrobene plochy, se již začíná věnovat pozornost integritě

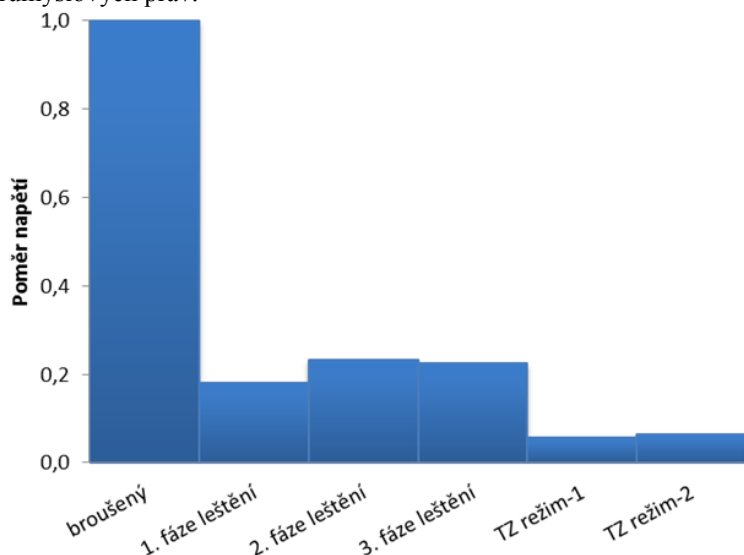
ostří nástroje (integrita řezné hrany). Na pracovišti autorů se této problematice věnuje významná pozornost. V tomto článku není prostor, aby byly všechny již publikované poznatky uvedeny. Poslední zveřejněnou publikací je článek [5]. V této publikaci byly uvedeny souhrnné poznatky o možnosti sledování (popisu) a ovlivnění integrity ostří. Zároveň byly popsány technologické procesy, které mají vliv na stav ostří a jeho následné souvislosti pro řezný proces a trvanlivost ostří, jakost obrobené plochy apod. Těžiště citovaného článku spočívá v tom, že po broušení je do materiálu vneseno poměrně vysoké zbytkové napětí, které má vliv na výsledné chování a stav ostří nástroje. Byly uvedeny i předpoklady týkající se vlivu tohoto zbytkového napětí na stav ostří po depozici tenké vrstvy a také přínosy procesů, které se používají pro úpravu mikrogeometrie ostří. Jak dokumentuje souhrnné schéma – obr. 3, je výsledný stav ostří velmi odlišný od požadovaného (teoretického) ostří. Této problematice je v současné době věnována na pracovišti autorů vysoká pozornost, neboť podle doposud získaných poznatků jsou dostupné jednoduché procesy, které mohou odstranit vnesené zbytkové napětí a tím získat předpoklady pro dosažení požadovaného ostří. Jak bude uvedeno dále, není však nežádoucí vliv zbytkového napětí ve slinutém karbidu jednoznačně prokázán. Z hlediska vzniklého defektu (obr. 3) není pochyb o jeho nežádoucím dopadu na stav ostří.



Obr. 3 – Schéma ostří nástroje, reálný stav ostří nástroje ze slinutého karbidu po broušení[7]

Fig. 3 – Schematic drawing of the cutting edge of a tool and an actual condition of the cutting edge of a cemented carbide tool after grinding

V případě, že je depozice vrstvy realizována na výše uvedené poškozené ostří, nelze očekávat, že bude splňovat kladené požadavky, neboť v nejdůležitější oblasti nástroje je nejen odlišná geometrie, ale dokonce defekt, který i z důvodu nízké houževnatosti se bude zvětšovat. Autoři článku tento reálný stav ostří přičítají generovanému zbytkovému napětí. Za účelem zjištění velikosti zbytkového napětí byly na různě povrchově upravených (broušených, leštěných a tepelně upravených) slinutých karbidech změřeny zbytková napětí. Běžně broušený slinutý karbid vykazoval zbytkové tlakové napětí překračující až 2500 MPa. Na druhou stranu se prokázalo, že již odstraněním materiálu do hloubky 10 µm dojde k výraznému poklesu zbytkového napětí (viz obr. 4). Největší pokles napětí byl vyvolán speciálním tepelným zpracováním slinutého karbidu, který je v současné době předmětem výzkumu a posléze bude hledána cesta k právní ochraně průmyslových práv.



Obr. 4 – Závislost zbytkových napětí v povrchu slinutého karbidu ve vazbě na jeho úpravu

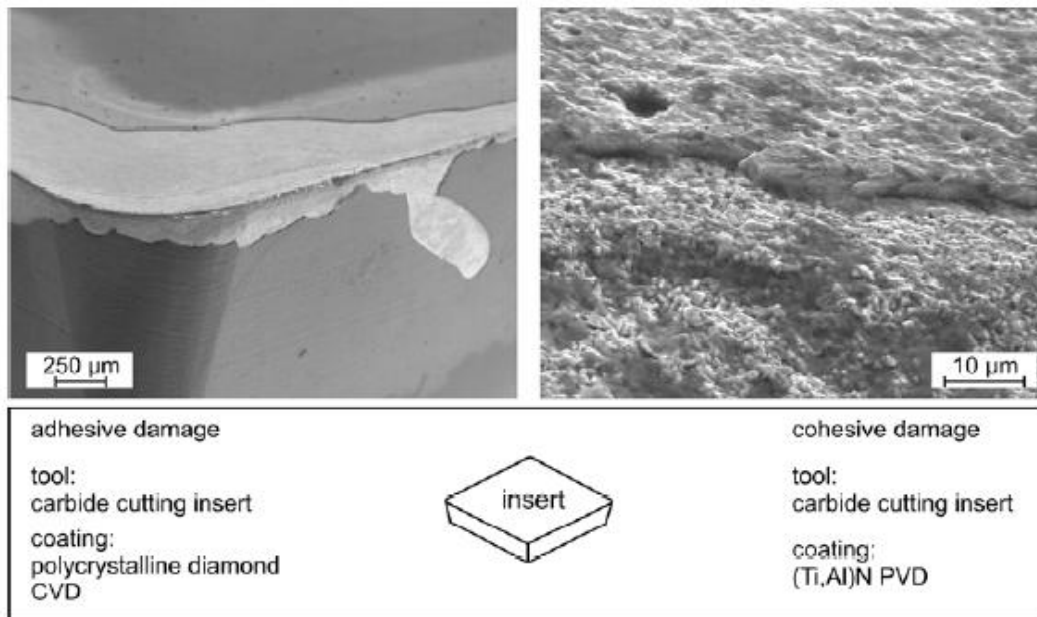
Fig. 4 – Residual stresses in the surface of cemented carbide following various treatments

Bez ohledu na vliv zbytkového napětí generovaného na povrchu slinutého karbidu jeho broušením (tato vazba bude uvedena v následujících kapitolách), je jednoznačné, že jak odstraněním nejvíce ovlivně oblasti šetrným způsobem nevznášející žádné další zbytkové napětí, nebo speciálním tepelným zpracováním, dojde k výraznému poklesu tlakové hodnoty.

4 Vliv zbytkového napětí na stav ostří

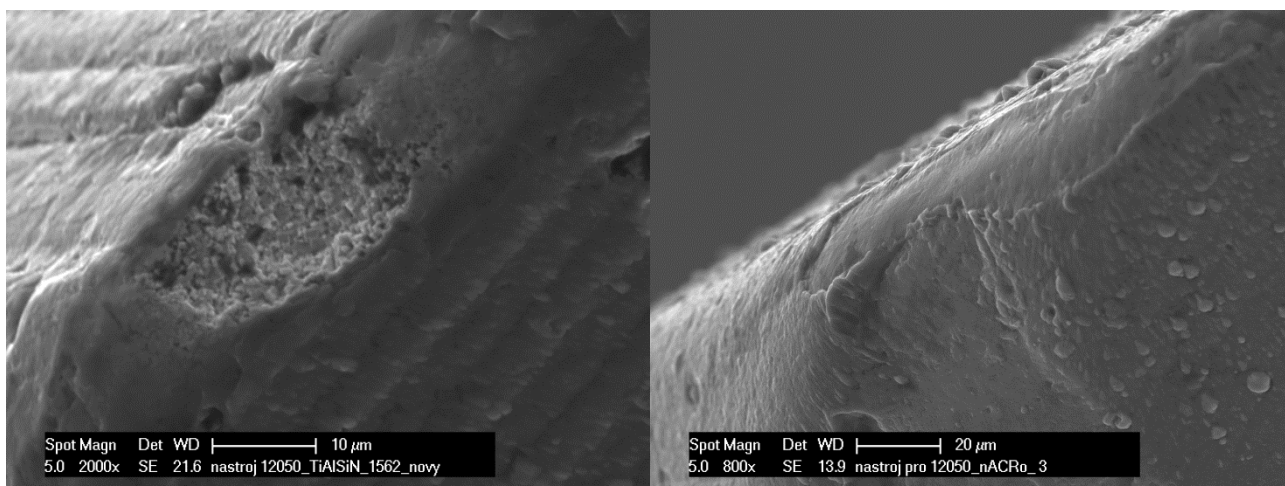
Integritu povrchu nelze hodnotit pouze z pohledu jednoho faktoru, byď by jím bylo zbytkové napětí. Vždy je potřeba zahrnout větší množství dalších parametrů, které umožní komplexní pohled a tím získat ucelený obraz, který lze obecně nazvat integritou povrchu. Tohoto přístupu jsou si autoři článku vědomi. Avšak pro prvotní zachycení vlivu zbytkového napětí na chování slinutého karbidu a stavu vytvořeného ostří, je tento přístup nezbytně nutný. Je v plánu, že se budou poznatky postupně rozšiřovat tak, aby byly naplněny vize integrity povrchu a její komplexní popis v požadovaném rozsahu. Ten je ovlivněn buď aplikací v praxi, popř. dosažení dalších základních informací, které rozšiřují stav poznání.

Jak dokumentuje následující obrázek potvrzený dlouhodobými zkušenostmi, k poškození nástroje po depozici může dojít v důsledku vysokých hodnot zbytkových napětí.



Obr. 5 - Adhezivní (vlevo) a kohezivní (vpravo) poškození deponovaných slinutých karbidů [6]
Fig. 5 – Adhesive (left) and cohesive (right) damage in coated cemented carbides [6]

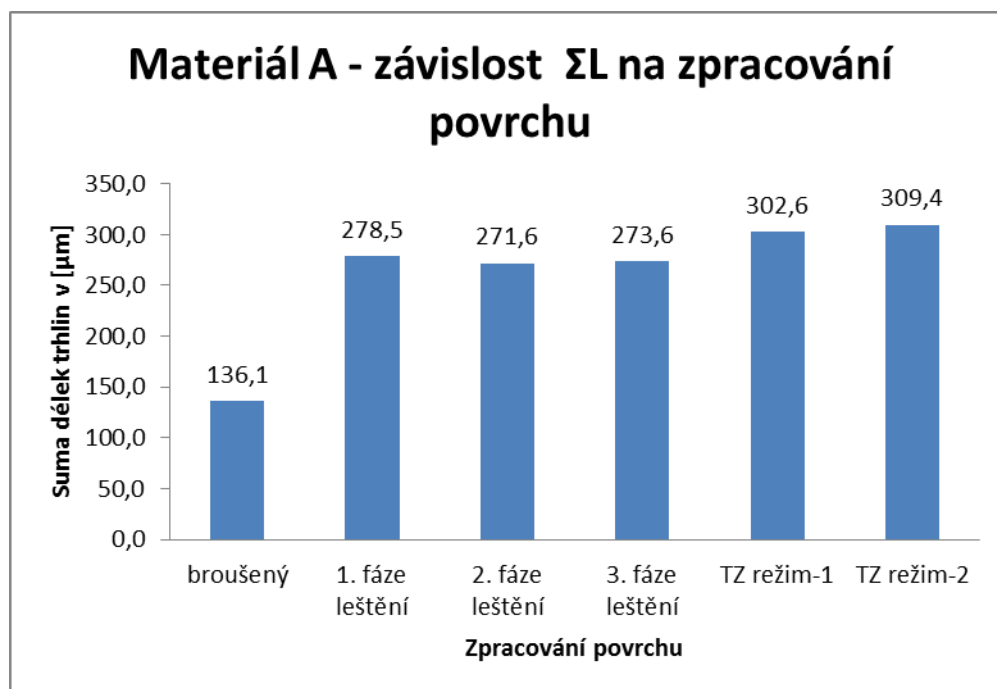
Uvedené schéma poškození potvrzuje obecnou myšlenku, že k poškození dochází v důsledku překročení tlakového napětí v podpovrchové oblasti slinutého karbidu. Díky vyšší teplotě CVD depozice dojde k vyrelaxování zbytkových napětí vzniklých broušením slinutého karbidu. Zbytková napětí ve vrstvě vytvořené touto technologií má díky odlišným teplotním roztažnostem v průběhu depozice tahový charakter. Na tato napětí reaguje slinutý karbid tlakovým napětím, které je příznivé, neboť se uzavírají případné trhliny a snižuje se nebezpečí poškození křehkého slinutého karbidu. V důsledku tohoto přechodu je poškození generováno v oblasti rozhraní tenká vrstva-slinutý karbid a vzniká adhezivní poškození. Rovněž druhá část schématu potvrzuje jeden směr, který zaujímá myšlenku, že u vrstev vytvořených PVD technologií dochází ke vzniku tlakového napětí, přičemž případně vnešené tlakové napětí ve slinutém karbidu nerelaxuje. V důsledku toho pak vzniká kohezivní poškození ve slinutém karbidu. V tomto okamžiku existují na vznik poškození dva pohledy. Jeden z autorů článku má zkušenosti v tom smyslu, že zvyšující se tlakové napětí ve vrstvách vytvořených PVD technologií má za následek další nárůst tlakového napětí také v oblasti slinutého karbidu. Pevnost tlaku slinutého karbidu - karbidického zrna se očekává okolo hodnoty 5000 MPa. Jakmile je této hodnoty dosaženo, dochází k rozvoji kohezivního poškození. Samozřejmě kobaltové pojivo má tlumící účinek, ale v okamžiku vyčerpání jeho plastických schopností dochází zde přednostně ke vzniku poškození. Takové poškození je zachyceno na obr. 6. Z detailního snímku vyplývá, že k poškození došlo právě v důsledku vyčerpání plastických schopností kobaltu, o čemž svědčí ostrohranný charakter karbidů wolframu (snímek vlevo). V případě, kdy překročí napětí pevnost v tlaku přímo ve vrstvě, dojde k jejímu kohezivnímu poškození (obr. 6 vpravo).



Obr. 6 – Kohezní poškození slinutého karbidu (vlevo), kohezní poškození vrstvy (vpravo)
 Fig. 6 – Cohesive damage in cemented carbide (left) and cohesive damage in the film (right)

Druhým myšlenkovým směrem se ubírají výsledky výzkumu, který řídí prof. Berend Denkena (Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen - Leibniz Universität Hannover). Ten poukazuje na pozitivní vliv zbytkových tlakových napětí v tenké vrstvě a v substrátu na životnost nástroje. Proto doporučuje, aby do povrchu slinutých karbidů bylo vneseno takové tlakové zbytkové napětí, které ještě materiál bezpečně snese. Díky vysokému tlakovému napětí bude rozdíl mezi tlakovým napětím ve vrstvě a ve slinutém karbidu minimální, čímž se bude snižovat nebezpečí kohezního poškození. Když toto napětí mezi vrstvou a slinutým karbidem bude v rovnováze, pak podle jeho úvah nehrozí „překlopení“ do nebezpečných tahových napětí a jsou eliminována nebezpečí kohezních poškození.

Na pracovišti autorů byly v minulosti provedeny experimenty, které jeho myšlenku částečně potvrzují. Jak dokumentuje obr. 7, má tlakové napětí na povrchu slinutého karbidu příznivý účinek na pomalejší šíření trhlin. Jestliže je toto tlakové napětí minimalizováno, pak je šíření trhliny snazší, tj. lomová houževnatost klesá.



Obr. 7 – Závislost šíření trhliny (součet délek trhlin v rozích vtisku po zkoušce dle Vickerse) na zbytkovém napětí na povrchu slinutého karbidu

Fig. 7 – Dependence of the crack propagation extent (sum of lengths of cracks radiating from the corners of Vickers indentation) on the residual stress in the cemented carbide surface

Přestože tyto výsledky potvrzují nárůst lomové houževnatosti v souvislosti s tlakovým zbytkovým napětím, nemusí tato souvislost platit v celém rozsahu tvrzení prof. B. Denkena, neboť hodnoty tlakového napětí se pohybovaly v rozmezí 100-1900 MPa. Lze očekávat, že v případě, kdy se budou limitně blížit k hraniční hodnotě pevnosti v tlaku slinutého karbidu, nastanou jiné podmínky a dojde k jeho koheznímu poškození.

Tyto dva rozpory jsou z hlediska přístupu ke slinutým karbidům natolik zásadní, že je nezbytné zjistit skutečný stav a podle toho pak směřovat další kroky výzkumu.

4 Závěr

Bylo prokázáno, že poškození ostří nástrojů ze slinutých karbidů souvisí nejen s depozicí tenkých vrstev, ale již s jejich stavem po broušení. Mnoho prokazatelných výsledků dokládá, že již po broušení dochází v důsledku vysokých zbytkových napětí ke koheznímu poškození v podpovrchových oblastech slinutého karbidu. Po depozici vytvořenou PVD technologií jsou ve vrstvách tlaková napětí. Toto je rovněž obecně platný vztah. Prozatím nedošlo ke shodě v tom, zda je tlakové napětí na povrchu slinutých karbidů před PVD depozicí škodlivé, nebo naopak přispívá k uzavírání trhlinek a především ke snížení rozdílu zbytkových napětí mezi vrstvou a slinutým karbidem. Jestliže by se ukázalo toto zbytkové napětí jako nevhodné v důsledku snazšího překročení pevnosti v tlaku, pak by byla vhodná jeho eliminace a to buď řízeným tepelným zpracováním, nebo procesy směřující k povrchové změně (odleštění povrchu např. procesem vlečného omílání nástrojů). V případě pozitivního dopadu tlakového zbytkového napětí by naopak bylo vhodné jeho přítomnost na povrchu slinutého karbidu posilovat a zajistit, aby nedošlo k jeho relaxaci. Prozatím se v praxi zbytková napětí měří a to jak ve vytvořených vrstvách, tak i na broušeném povrchu slinutého karbidu, aniž by byly získány jednoznačné poznatky o výsledném vlivu na chování řezného nástroje, trvanlivost ostří, ale i o dopadech na jakost obrobené plochy.

Z tohoto důvodu bude celé této problematice věnována značná pozornost, aby byl zmapován tento vliv a to nejen z hlediska zbytkových napětí, ale i z hlediska komplexních vlastností. Ať se jedná o již započaté experimenty popisující souvislosti mezi zbytkovým napětím a lomovou houževnatostí, ale také souvislosti týkající se depozice, popř. odstranění vrstev (stripping), degradační procesy vyvolané chemickými reakcemi za působení různých chemických prostředí popř. vyšších teplot (400-1000°C), fyzikální procesy (iontový bombard v předdepozicičním procesu). Cílem těchto souhrnných studií bude získat dostatečné množství relevantních informací, které bude možné zpracovat podle zásad integrity povrchu a získat tak komplexní výsledky uplatnitelné jak v základním i aplikovaném výzkumu tak i přímo v praxi. Doposud byly odladěny technologie, jimiž lze prokazatelně snížit zbytková napětí na povrchu broušeného slinutého karbidu. I přesto, že se prokáže pozitivní vliv tlakových zbytkových napětí na konečný stav deponovaného nástroje, bude se v tomto experimentu dále pokračovat. Ústřední myšlenkou je, že by se mohlo realizovat broušení nástrojů pro slinuté karbidy horšími podmínkami (méně kvalitní brusný kotouč, horší řezné parametry), přičemž před vznikem nežádoucích defektů v oblasti ostří v důsledku překročení mezních hodnot by došlo k jejich relaxaci a obnovení původních stavů aniž by došlo k iniciaci nežádoucích poškození.

Tento článek a provedené analýzy byly realizovány na základě řešení studentského projektu SGS – 2012-044 „Aplikace progresivních vrstev na řezné nástroje s důrazem na integritu obrobeného povrchu a řezné hrany“ a dále projektu NEXLI Z - CZ.1.07/2.3.00/30.0038, který je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

5 Literatura

- [1] HUMÁR, A. (2008). *Materiály pro řezné nástroje*, MM publishing, s.r.o., Praha, s. 235
- [2] GANEV, N. a I. KRAUS. (2002) *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí*. Praha. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikální inženýrská [cit. 2014-27-11]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>
- [3] KATHREIN, M. (2002) *Grundlagen der Beschichtung. Kundenseminar Ceratizit*, Reutte 2002
- [4] KŘÍŽ, A. (2006). *Vliv mikrostruktury slinutých karbidů na životnost nástrojů a strojních součástí*. In Fractography. Košice: Institute of Material Research of the Slovak Academy of Sciences. s. 363-370.
- [5] KŘÍŽ, A. (2014) *Integrita povrchu řezné hrany nástroje*. In Vrstvy a povlaky 2014. Trenčín, 2014. s. 77-83.
- [6] BREIDENSTEIN, B. a DENKENA, B. (2008) *Residual stress depth distributions in uncoated, PVD coated*. Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universität Hannover, Germany.
- [7] KŘÍŽ, A. a ŠPIRIT, Z. (2013) Properties of cemented carbides upon thermal exposure. In *Materiály v tepelném zpracování*. Čerčany. s. 179-186.

Abstract

Article: Surface Integrity of Cutting Edge of Cemented Carbide Tool

Authors: Antonín Kříž¹,
Kamil Kolařík¹,
Antonín Janoušek¹,
Jan Palán¹

Workplace: ZČU Plzeň, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, Česká republika. E-mail: kriz@kmm.zcu.cz

Keywords: surface integrity, cutting edge of tool, cemented carbides, residual stresses

The paper reviews the current knowledge of surface integrity of the cutting edge. As the authors have published a number of similar papers in recent years, the goal of the present one is to summarise today's fundamental knowledge and outline the future orientations of cemented carbide applications in the manufacture of cutting tools. Now, their development is inconceivable without taking into account the principles of surface integrity of the cutting edge. The progress in this discipline contributed to the description of a number of processes which take place during the production of cutting tools, as well as in the cutting process. The paper briefly outlines processes from both theoretical and practical perspectives.

