

БРЗОРЕЗНИ ЧЕЛИЦИ – ЗАМОРНО ПОНАШАЊЕ И ИСПИТИВАЊЕ ПОВРШИНЕ ЛОМА**HIGH-SPEED STEELS – FATIGUE BEHAVIOR AND FRACTURE SURFACE EXAMINATION**Марко Микулек, Драган Рајновић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО**

Кратак садржај – У раду је теоријски анализирано заморно понашање брзорезних челика и практично испитана површина лома. Дата је подела, врсте, састав и особине брзорезних челика, и понашање при замору. Извршена је карактеризација материјала 3 резна алата (3 бургије), и испитана њихова површина лома уз детаљан опис и дискусију добијених резултата.

Кључне речи: Брзорезни челици, Замор, Испитивање површине лома

Abstract – In the paper a fatigue behavior of high-speed steels is theoretically analyzed, while the fractured surfaces are practically examined. The division, types, composition and characteristics, and fatigue behavior of high-speed steels are described. The experimental characterization of the 3 cutting tools (3 drills) materials was performed. Also, fracture surfaces were examined, supported with a detailed description and discussion of the results obtained.

Key words: High-speed steels, Fatigue, Fracture surface examination

1. УВОД**1.1. Брзорезни челици**

Почетком 20. века установљено је да најбоље резне особине имају челици са високим садржајем волфрама (W) и угљеника (C) пошто се закале са високе температуре и високо температурно отпусте. Они се називају брзорезни челици, HS или HSS (енгл. High Speed Steel). Брзорезни челици представљају најважнији и најчешће примењивани високолегирани алатни челик са већим садржајем легирајућих елемената: хром (Cr), волфрам (W), молибден (Mo), кобалт (Co) и ванадијум (V) [1, 2]. Брзорезни челици, предвиђени су за рад у условима повишене и високе температуре тј. за велике брзине резања.

Најчешће се подела брзорезних челика врши према:

- основним легирајућим елементима
- хемијском саставу
- особинама и примени
- термичкој обради

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Драган Рајновић, ванр. проф.

Брзорезни челици се обавезно термички обрађују како би се извршила промена структуре и добила одговарајућа механичка својства. Термичка обрада брзорезних челика је специфична [3, 4] и се састоји се из каљења и отпуштања.

1.2. Заморно понашање брзорезних челика

Услед дуготрајног дејства периодично променљивих оптерећења може да настане постепено разарање материјала, сама појава назива се **замор материјала**, а тако изазван лом, лом услед замора. Испитивање замарањем у циљу одређивања динамичке чврстоће може се вршити затезањем, притискивањем, савијањем, увијањем или комбиновањем наведених напрезања

Процес замарања се може поделити на три фазе:

- Прва фаза-стварање (иницирање) прслине
- Друга фаза-раст (ширење) прслине
- Трећа фаза-лом

Прва фаза замарања настаје стварањем мале прслине, која под утицајем променљивог напрезања лагано расте. Површина лома се обично састоји из две зоне које имају сасвим различит изглед. Зона која одговара лаганом расту прслине је по правилу углачана, са видљивим „линијама одмора“, а зона која одговара брзом расту прслине је неправилна и „зрнаста“. Брзина раста прслине зависи од напрезања и дужине прслине.

Експериментална истраживања су показала да су главни могући узроци лома бургија од брзорезних челика управо:

- замор материјала
- концентracија напона
- заостали унутрашњи напони (који у многоме утичу на стварање и раст прслине)
- материјал израде
- хемијски састав бургије
- микроструктура материјала
- појаве различитих врста укључака (карбида) на самој површини материјала и испод површине
- нехомогене структуре
- неравномерног распореда легирајућих елемената
- врсте оптерећења
- термичка обрада

1.3. Примена брзрезних челика

Брзрезни челици нашли су веома широку примену у разним гранама индустрије захваљујући својим одличним особинама: високој тврдоћи, чврстоћи, жилавости, доброј отпорности према хабању, постојаности на повишеним температурама. Захваљујући овим особинама брзрезни челици се углавном користе за израду различитих алата у свим гранама индустрије, слика 1. Примењују се за израду различитих алата за обраду метала и других материјала, који раде на повишеним температурама тј. са великим брзинама резања [6, 7].



Слика 1. Алати израђени од брзрезних челика [8]

1.4. Циљ рада

Циљ рада је да се практично испитају карактеристике 3 бургије различитих произвођача и од различитих материјала, односно одреди њихов хемијски састав, микроструктура и карактеристике лома. Утврђене вредности су повезане за подацима из праксе о њиховом понашању у експлоатацији.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОЦЕДУРА

У раду су анализиране и испитане површине и узроци лома бургија, одређеног хемијског састава и особина. Бургије су коришћене у свакодневној серијској производњи, при чему је дошло до лома. Испитивање узорка је спроведено у лабораторији за испитивање материјала на Факултету техничких наука у Новом Саду.

2.1 Испитивани узорци

Испитивање је извршено на следећим узорцима бургија (слика 2):

1. Бургија за метал, "Беорол", ϕ 5mm
2. Бургија "Terarax by Roko", ϕ 4,5 mm
3. Бургија "Индустрија алата Требиње", ϕ 5mm



Слика 2. Изглед бургија након лома

Хемијски састав испитиваних узорка бургија одређен је оптичко емисионом спектроскопијом на уређају "SPECTROLAB", у лабораторији Слобада Чачак, а резултати испитивања су приказани у табели 1.

Према хемијском саставу само узорак "Индустрија алата Требиње", одговара класичном брзрезном челику класе HSS 6-5-2-5 односно \checkmark 9780. Док узорци "Беорол", и "Terarax by Roko", припадају класи алатних хромних челика приближно X100CrMoV5, али уз додатак волфрама (W).

Табела 1. Хемијски састав узорка

Хемијски елементи [mass %]	"Беорол"	"Terarax by Roko"	"Индустрија алата Требиње"
C(%)	1,23	1,01	0,97
Si(%)	0,88	0,65	0,12
Mn(%)	0,25	0,34	0,26
P(%)	0,040	0,035	0,020
S(%)	0,020	0,003	0,012
Cr(%)	4,77	5,27	4,54
Mo(%)	0,56	1,20	4,96
Ni(%)	0,20	0,14	0,27
Co(%)	0,05	0,12	4,61
V(%)	0,48	0,50	1,65
W(%)	0,62	1,05	6,15

2.2 Припрема металографских узорка

Узорци за испитивање микроструктуре материјала припремљени су стандардном металографском методом која се састојала од исецања, монтирања, брушења, полирања и нагризања узорка. Исецање је извршено на уређају Diskotom, Struers, након исецања узорци су затопљени топлим поступком у бакелитну смесу на преси Prontopres, Struers. Након припреме узорка извршено је нагризање, како би површина узорка била глатка и видљива на микроскопу.

2.3 Уређаји и опрема за испитивање узорка

Након припреме узорка бургија, извршена је анализа микроструктуре на испитиваним узорцима у полираном и нагриженом стању. Узорке су посматрани при различитим увећањима на светлосном микроскопу (CM) Leitz „Orthoplan“. Након посматрања и анализе испитиваних узорка на светлосном микроскопу, узорци су посматрани на СЕМ микроскопу који је примењиван у испитивању површина лома узорка. Испитивање тврдоће и микротврдоће узорка извршено је методом по Роквелу (HRC) дуж осе бургија по површини на уређају VEB HP-250, и методом по Викерсу на попречном пресеку унутар узорка, на уређају Tukon 1102 Wilson, респективно.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

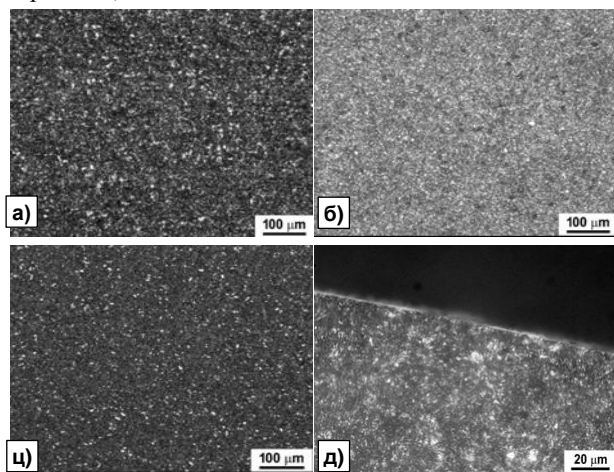
3.1 Испитивање микроструктуре бургија

Микроструктура (након нагризања) бургије произвођача "Беорол" приказана је на слици 3а. Јасно су видљиви крупнији (ледебуритни) карбиди и ситни, сферни (секундарни) карбиди у мартензитној основи. Присуство равномерно распоређених карбида побољ-

шава отпорност на хабање. Микроструктура основе је мартензитна, присутан је ситноигличасти (виде се иглице) отпуштени мартензит са равномерно распоређеним ситнијим и крупнијим карбидима.

На слици 3б приказана је микроструктура бургије произвођача "Terarax by Roko". У узорцима је присутна мања количина неметалних укључака, оксидно глобуларног типа, као и код претходно испитиваног узорка. На нагриженој површини видљиви су крупни (примарни) карбиди и ситни (секундарни) карбиди у феритној основи. (слика 3б). Ситнији карбиди у феритној основи доприносе отпорности на хабање.

Микроструктура бургије произвођача "Индустрија алата Требиње" приказана је на слици 3ц. Присутна је мања количина неметалних укључака, оксидно глобуларног типа, као и код претходних узорка. микроструктура основе садржи крупне (ледебуритне) карбиде и ситне, сферне (секундарне) карбиде у мартензитној основи. Присутан је фини отпуштени мартензит, без иглица.



Слика 3. Микроструктура бургија а) Беорол, б) Terarax by Roko, ц) Индустија алата Требиње, д) превлака на површини бургије дебљине око 1 μm

Посматрањем на микроскопу код све три испитиване бургије уочена је танка превлака (слика 3д) на површини дебљине 1-2 μm. На основу расположивих података може се претпоставити да је код узорка "Беорол" и "Индустрија алата Требиње" присутна титан-нитридна превлака, док је код бургије "Terarax by Roko" присутна DLC (diamond like carbon - дијаманту сличан угљеник) превлака, високе тврдоће.

3.2 Резултати мерења тврдоће

Резултати испитивања тврдоће дуж осе узорка по површини и микротврдоће унутар језгра узорка приказани су у табели 2.

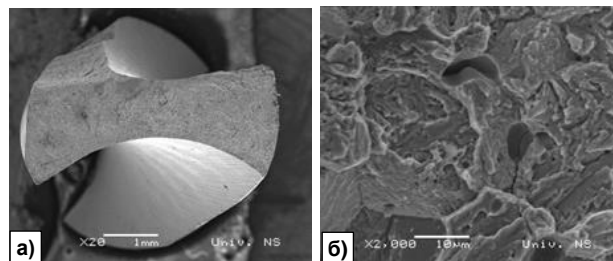
Вредности тврдоће површине се крећу од 55 до 64 HRC, што је за резне алате од брзорезних челика задовољавајуће, али се препоручује да те вредности буду у границама 60-64 HRC након термичке обраде. Варирању измерених тврдоћа површине доприноси и различита превлака на бургијама, као и њена потрошеност. Поред тога, повећање расипања вредности са мерењем HV0.5 и добијања већих вредности долази услед мање површине отиска, при чему може да се измери тврдоћа само једног карбида или мартензитне основе.

Табела 2. Резултати испитивања тврдоће материјала

Тврдоћа материјала	HSS "Беорол"	"Terarax by Roko"	"Индустрија алата Требиње"
Површина (HRC)	51	64	54,5
	54	59,5	56,5
	54	61	58,5
Сред. вред.	53	61,5	56,5
Језгро (HV1)	528	258	730
	557	236	735
	531	255	680
Сред. вред.	539	250	715
Језгро (HV 0.5)	643	520	806
	755	567	797
	672	531	846
Сред. вред.	690	539	816

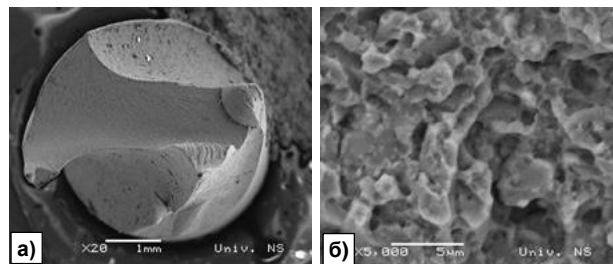
3.3 Испитивање површине лома

На слици 4а је приказан је макро изглед површине лома узорка бургије "Беорол". На месту лома, није уочена појава заморне прслине, што сугерише да је до лома бургије дошло услед преоптерећења тела бургије, да ли услед неправилног руковања, или обраде не одговарајућим режимима обраде. Морфологија површине лома има карактеристике интеркристалног кртог лома (лом по границама зрна) уз местимичну појаву и транскристалног кртог лома насталог механизмом квази-цепања, слика 4б. На површини лома, могуће је уочити и повећано присуство малих сферних рупица.



Слика 4. Изглед површине лома узорка бургије "Беорол", а) макро; б) микро; SEM микроскоп

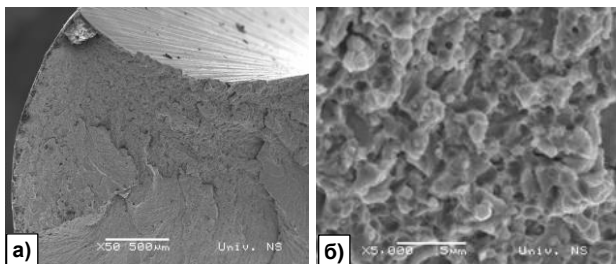
Изглед микроструктуре узорка бургије, при различитим увећањима, произвођача "Terarax by Roko" приказан је на слици 5. Морфологија површине лома има карактеристике транскристалног дуктилног лома, карактеристичног за високоугљенични челик са великом количином ситних секундарних карбида, слика 5б.



Слика 5. Изглед површине лома узорка бургије "Terarax by Roko", а) макро; б) микро; SEM микроскоп

Изглед микроструктуре узорка бургије, при различитим увећањима, произвођача "Индустрија алата Требиње" приказан је на слици 6. Површина лома се у

некој мери разликује у односу на претходне бургије. Централни део има лом који је нормалан на осу бургије, док периферни делови бургије (према леђним површинама) се ломе под углом, слика 6а. Такође, на површини лома се могу уочити зоне са различитим макроскопским карактеристикама лома, тј. уочавају се подручја са различитим изгледом стреластих шара и лезастих површина. Морфологија површине лома има карактеристике транскристалног дуктилног лома. Површина лома је пуна ситних малих јамица насталих минималном пластичном деформацијом око ситних сферних честица секундарних карбида, слика 6б.



Слика 6. Изглед површине лома узорка бургије "Индустрија алата Требиње", а) макро; б) микро; SEM микроскоп

4. ЗАКЉУЧАК

На основу експерименталних истраживања и добијених резултата у оквиру овог рада, могу се извући следећи закључци о понашању 3 бургије различитих произвођача:

- Особине бургија директно зависе од хемијског састава, односа легирајућих елемената, микро-структуре, термичке обраде и нанете превлаке.
- Лом код сва три узорка бургија је узрокован услед преоптерећења тела бургије, да ли услед неправилног руковања, или обраде неодговарајућим режимима обраде. Ни код једне бургије није уочена појава замора
- Изванредна комбинација чврстоће, жилавости и тврдоће бургија "Индустрија алата Требиње", остварена употребом квалитетног брзорезног челика и одговарајуће термичке обраде, а потврђена карактеристикама тврдоће и изгледом површине лома, је допринела да су експлоатационе карактеристике ових бургија у производној пракси најбоље у односу на друге две испитиване бургије.
- Бургија "Terax by Roko" поседује средње експлоатационе карактеристике, док бургија "Беорол" поседује најлошије експлоатационе карактеристике.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Л. Шиђанин, К. Герић, „Машински материјали“, скрипта, Факултет техничких наука у Новом Саду, 2006/2007.
- [2] Л. Шиђанин, „Машински материјали 2“, Факултет техничких наука у Новом Саду, 1996.
- [3] Б. Шкорић, „Пројектовање погона термичке обраде за израду алата од брзорезног челика“, Нови Сад: Факултет техничких наука, Одсек за производно машинство, 2020.
- [4] М. Оруч, „Алатни челици“, Универзитет у Зеници, Металуршко-технолошки факултет, 2019.
- [5] D.D.D.P. Tjahjana, Y. Waloyo, Triyono, „Failure Analysis of Super Hard and Mil HSS-Co“, *Open Engineering*, Vol. 9/1, pp. 202-210, 2019.
- [6] A.M. Bayer, B.A. Becherer, „High-Speed Tool Steels Machining“, *ASM Handbook*, Vol 16, ASM International, pp. 51-59, 1989
- [7] D.J. Medlin, R. Compton, „Metallography of Biomedical Orthopedic Alloys“, *Metallography and Microstructures*, *ASM Handbook*, Vol 9, ASM International, pp. 961–968, 2004.
- [8] G. Roberts, G. Krauss, R. Kennedy, „Tool Steels“, *ASM International*, pp. 258-265, 2012.

Кратка биографија:



Марко Микучек, дип. инж. маш., рођен је у Руми 1987.г. Завршио је средњу техничку школу "Миленко Брзак - Уча" у Руми. Основне академске студије, смер Производно машинство завршио је на Факултету техничких наука у Новом Саду. Запослен је као наставник у средњој техничкој школи „Никола Тесла“ Сремска Митровица. Мастер студије завршава 2022.г.



Др Драган Рајновић, ванр. професор, рођен је 1975.г. у Вуковару. Дипломирао је на Факултету техничких наука 2000.г., на коме је од тада и запослен у настави. У звање ванредног професора изабран је 2020.г. за уно: Материјали и технологије спајања. Специфична област интересовања: микроскопија и испитивање материјала.