International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА СИЛАТА НА РЯЗАНЕ И ГРАПАВОСТТА ПРИ СТРУГОВАНЕ НА БЕЗОЛОВНИ МЕСИНГИ

Ростислав Станимиров Монев

Технически университет – Габрово, 5300 Габрово, България
**кореспондиращ автор: Ростислав Станимиров Монев, e-mail: rosti_monev@abv.bg*

COMPARATIVE ANALYSIS OF CUTTING FORCE AND SURFACE ROUGHNESS IN TURNING OF LEAD-FREE BRASSES

Rostislav Stanimirov Monev

Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: Rostislav Stanimirov Monev, e-mail: rosti_monev@abv.bg*

Abstract
The replacement of leaded brasses requires a balanced assessment of cutting forces, surface quality and chip formation. This paper presents a comparative analysis of published results for turning eco-friendly lead-free brass alloys. The aim is to identify the cutting parameters and microstructural factors with the strongest influence on the main cutting force and surface roughness. Data reported for CW510L, CW511L and C27450 are considered together with findings for reference leaded brass CW614N. The analysis shows that depth of cut predominantly affects cutting force, while feed rate has the strongest effect on surface roughness. Increasing the beta-phase fraction can improve chip segmentation, but silicon-containing constituents may intensify abrasive tool wear. A combined optimisation approach is therefore required, in which cutting parameters, alloy microstructure and tool material are selected together. The conclusions provide a basis for planning subsequent turning experiments with lead-free brass under controlled conditions.

Keywords: lead-free brass; turning; cutting force; surface roughness; machinability.

ВЪВЕДЕНИЕ

Месингите се използват широко за изработване на арматура, фитинги и прецизни машинни детайли поради добрата им технологичност, корозионна устойчивост и механични свойства. Оловосъдържащите месинги, например CW614N и CuZn38Pb3, традиционно се предпочитат при струговане, тъй като оловните включвания подпомагат раздробяването на стружката и намаляват натоварването на инструмента [3, 7].

Оловото обаче е токсичен елемент, а употребата му създава рискове за здравето и околната среда, особено при изделия с възможен контакт с питейна вода. Затова разработването на месинги без целенасочено добавяне на Pb е важно за ограничаване на този риск и за изпълнение на приложимите продуктови изисквания [7]. Екологичното предимство не означава автоматично по-добра обработваемост.

При безоловните месинги CW510L (CuZn42), CW511L и C27450 поведението при струговане зависи от фазовия състав и режима на обработване. В определени условия са възможни по-дълги стружки, по-високи сили на рязане и ускорено износване. При силициевия месинг CuZn21Si3P твърдите структурни съставки могат да усилят абразивното износване [2, 4]. Следователно изборът на бе-

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

золовна сплав изисква едновременно оценяване на безопасността, качеството на обработената повърхнина и натоварването на инструмента.

Целта е да се сравнят публикувани експериментални резултати за силата на рязане Fc, грапавостта Ra, стружкообразуването и износването при струговане на оловосъдържащи и безоловни месинги. За всяка съпоставка се отчитат материалът, инструментът и режимът на рязане.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследвания, свързани с обработваемостта на оловни и безоловни месинги по критериите сила на рязане, грапавост на обработените повърхнини, износване на режещите инструменти и стружкообразуване са проведени от редица автори [1-6].

В изследването си Toulfatzis и съавт. [1] са приложили план на Taguchi L16 и дисперсионен анализ при обработване за оловен и безоловен месинг. В рамките на този конкретен експериментален план е установено, че дълбочината на рязане a_p води до 64,40% от вариацията на Fc, а минутното подаване f_m — до 55,31% от вариацията на грапавостта Ra. Това са относителни дялове в разглеждания модел, а не универсални стойности за всички изследвани месинги. Потвърждаващите опити, при които са определени стойности на силата F_c = 39,37 N при струговане на оловосъдържащ месинг CW614N и на грапавостта Ra = 1,71 μm при обработване на безоловен месинг CW511, са проведени при различни оптимални режими.

Johansson и съавт. [3] са сравнили обработваемостта на безоловен месинг CuZn42 с оловосъдържащ месинг CuZn38Pb3 при v_c = 200 m/min, a_p = 2 mm и f = 0,05–0,30 mm/rev. Оловото улеснява прекъсването на стружката; като авторите не потвърждават предположението, че действието му непременно се дължи на образуването на непрекъснат смазващ слой от разтопено Pb. Следователно различията в стружкообразуването трябва да се разглеждат във връзка с деформацията и разрушаването на стружката.

Bushlya и съавт. [4] сравняват силициевия безоловен месинг CuZn21Si3P с оловосъдържащия месинг CuZn39Pb3, като изследват износването на непокрити и покрити твърдосплавни инструменти. Изследванията на силите са проведени при v_c = 400 m/min, a_p = 2,5 mm и f = 0,05–0,30 mm/rev. Отчетени са приблизително 35–40% по-високи сили при обработване на силициевия безоловен месинг.

Nobel и съавт. [2] изследват стружкообразуването и износването при обработване на безоловни месинги с различни инструменти и покрития. Наличието на DLC покритие и на диамантено покритие намалява адхезионното и абразивното въздействие. Amaral и съавт. [5] използват инструменти от поликристален диамант (PCD) при сухо струговане на месинги с различно съдържание на Pb. Поради различните режещи материали, режими и изследвани сплави резултатите за износване и грапавост не могат да се сравняват количествено с тези, получени в [1].

В [6] едни и същи сплави са изпитани преди и след термична обработка при фиксиран за всяка сплав режим. При обработване на безоловен месинг CW510L силата F*c* намалява от 540 на 530 N, а при обработване на безоловен месинг CW511L — от 446 на 431 N. При безоловен месинг C27450 обаче тя се увеличава от 346 на 373 N. Следователно термичната обработка няма еднопосочен ефект; резултатът зависи от сплавта, микроструктурата и конкретния режим.

В таблица 1 са обединени режимите на рязане (n - честота на въртене (min^{-1}), v_c — скорост на рязане (m/min), a_p — дъл-

бочина (mm), f — подаване на оборот (mm/rev), f_m — минутно подаване (mm/min)), вида на използваните режещи инструменти и получените резултати относно силата на рязане и грапавостта на обработените повърхнини.. Съпоставката показва три различни експериментални подхода: изменение на режима [1], сравнение на сплави и инструменти [2–5] и изменение на микроструктурата чрез термична обработка [6].

Таблица 1. *Сравнение на експерименталните условия и резултати*

Изследване и материал	**Режещи инструменти и режим на рязане**	**Получен резултат**
[1] Toulfatzis: CW510L, CW511L, C27450 (без Pb); CW614N (с Pb)	Непокрит твърдосплавен инструмент HTi10, сухо струговане; n = 1500–2250 min^{-1}; a_p = 0,5–2 mm; f_m = 150–500 mm/min	В рамките на плана a_p обяснява 64,40% от вариацията на Fc, а f_m— 55,31% от вариацията на Ra. Потвърждаващ опит: F_c = 39,37 N за CW614N при n = 2250 min^{-1}; a_p = 0,5 mm; f_m = 150 mm/min; Ra = 1,71 μm за CW511L при n = 1750 min^{-1}; a_p = 0,5 mm; f_m = 150 mm/min
[2] Nobel: CW510L и други безоловни месинги	Твърдосплавни инструменти без покритие и с покрития TiAlN, TiB_2, DLC и CVD-диамант; изследвани са и PCD инструменти. За серията на износване при CW510L: v_c = 200 m/min, a_p = 1 mm, f = 0,30 mm/rev	Разгледани са стружкообразуване, натоварване и износване. Определени комбинации покрития, включително DLC и диамант, ограничават износването. Не се извеждат единни числови стойности за Fc или Ra, съпоставима с тези в [1].
[3] Johansson: CuZn42 (без Pb) / CuZn38Pb3 (с Pb)	Непокрита твърдосплавна режеща пластина. v_c = 200 m/min; a_p = 2 mm; f = 0,05–0,30 mm/rev.	Pb подпомага прекъсването на стружката и намалява натоварването. Не е потвърдена хипотезата за непрекъснат смазващ слой от разтопено Pb.
[4] Bushlya: CuZn21Si3P (без Pb) / CuZn39Pb3 (с Pb)	Непокрити и покрити твърдосплавни инструменти. За силите: v_c = 400 m/min, ap = 2,5 mm, f = 0,05–0,30 mm/об. За износването: vc = 400 m/min, a_p = 0,8 mm, f = 0,20 mm/rev.	При съпоставимите опити за сили безоловният месинг CuZn21Si3P показва приблизително 35–40% по-високи сили. Силите при обработване на силициевия месинг не са съимериви с тези при обработване на CW510L.
[5] Amaral: три вида месинг с различно съдържание на Pb	Поликристален диамант (PCD), сухо струговане; $v_c \approx$ 80–430 m/min; f = 0,05; 0,14; 0,25 mm/rev;	Оценяват се сили, грапавост и стружкообразуване. Влиянието на Pb зависи от режима и състава. Поради използването на PCD резултатите не се приравняват пряко към опити с твърдосплавни пластини.
[6] Toulfatzis: CW510L, CW511L, C27450 — преди/след термообработка	За CW510L: 775 °C, 60 min; n = 1750 min^{-1}, a_p = 1,5 mm, f_m = 500 mm/min. CW511L: 850 °C, 120 min; n = 1750, a_p = 2 mm, f_m = 250 mm/min. C27450: 850 °C, 120 min; n = 1500, a_p = 1,5 mm, f_m = 250 mm.min.	Fc: за безоловен месинг CW510L 540 → 530 N; за безоловен месинг CW511L 446 → 431 N;за безоловен месинг C27450 346 → 373 N. За безоловен месинг CW511L Rt: 40,1 → 26,0 μm. Ефектът от термообработката е различен за различните сплави.

Съществената разлика е кои фактори се поддържат постоянни и кои се менят. Поради това количествените резултати са сравними преди всичко само в една експериментална серия, а между публикациите могат да се обсъждат основно тенденции и ограничения.

При интерпретацията са разграничени три величини: скорост на рязане v_c (m/min), честота на въртене n (min^{-1}) и подаване f (mm/rev). Минималните стойности на диаметрите на изследваните материали, както и непосочването на геометрията на режещите инструменти и неприлагането на еднакъв метод за из-

мерване ограничават възможностите за пряко сравнение на измеримите сили и грапавости. Например в [1] силата Fc = 39,37 N е измерена за оловосъдържащ месинг CW614N при n = 2250 min^{-1}, a_p = 0,5 mm и f_m = 150 mm/min, а грапавостта Ra = 1,71 μm е получена за безоловен месинг CW511L при n = 1750 min^{-1}, a_p = 0,5 mm и f_m = 150 mm/min.

При изследванията на силите, представени в [4], режимът на рязане е v_c = 400 m/min, a_p = 2,5 mm и f = 0,05–0,30 mm/rev, докато продължителните изпитвания за износването са проведени при v_c = 400 m/min, a_p = 0,8 mm и f = 0,20 mm/rev.

Резултатите от проведените изследвания на процеса на стружкообразуване при струговане на безоловен месинг CW510L с пластина VCMT 160404-FPC IC520N с комбинирано износоустойчиво покритие от TiN и TiCN. в условията на фирма Вилерой и Бох България АД дават основание да се препоръчат следните елементи на режима на рязане: v_c = 125 m/min, a_p = 0,6 mm и f = 0,1 mm/rev.

Коректното сравнение изисква еднакви методи за измерване на изслезваните величини, съпоставими инструменти и режим, както и ясно разграничаване на оловосъдържащите, безоловните и силициевите месинги. Публикуваните данни не позволяват обща числова класация на обработваемостта за всички изследвани сплави.

За последващо собствено изследване на безоловен месинг CW510L може да се предложи провеждането на многофакторен експеримент с една партида обработван материал с предварително определени химични и физико-механични свойства, с режещи инструменти с еднаква геометрия и материал на режещата пластина и постоянна среда на обработване. Могат да се изберат три нива на подаване f и три нива на дълбочина на рязане a_p при фиксирана скорост на рязане v_c. За всеки опит ще се измерват главната сила на рязане F_c и грапавостта Ra, като се документират формата на стружката и износването, а редът на опитите се рандомизира. Конкретните нива на изследваните фактори ще се определят след предварителни проби според възможностите на машината и инструмента. Този план ще позволи да се оценят отделните и съвместните ефекти на подаването f и дълбочината на рязане ap при струговане на за конкретната партида безоловен месинг CW510L.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведеното сравнение на експерименталните резултати показва, че обработваемостта на безоловните месинги не може да се характеризира с една универсална стойност за сила на рязане или грапавост. Установено е, че дълбочината на рязане има най-голям принос към изменението на главната сила на рязане F_c, а минутното подаване — на Ra. При струговане на силициевия месинг CuZn21Si3P са отчетени по-високи сили спрямо тези при конкретна оловосъдържаща сплав [4], но това не е пряко доказателство за поведението на безоловния месинг CW510L. Термичната обработка намалява главната сила на рязане F_c за безоловните месинги CW510L и CW511L, но води до увеличението й за безоловен месинг C27450 [6]. Следователно използването на безоловен месинг трябва да съчетава ограниченията за употреба на Pb с подбор на обработвана сплав, инструмент и режим на рязане.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Toulfatzis, A.I., et al. Machinability of Eco-Friendly Lead-Free Brass Alloys: Cutting-Force and Surface-Roughness Optimization. Metals, 2018, 8, 250. DOI: 10.3390/met8040250. https://doi.org/10.3390/met8040250

[2] Nobel, C., Klocke, F., Lung, D., Wolf, S. Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys. Procedia CIRP, 2014, 14, 95–100. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.018. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.018

[3] Johansson, J., et al. On the function of lead (Pb) in machining brass alloys. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2022, 120, 7263–7275. DOI: 10.1007/s00170-022-09205-0. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09205-0

[4] Bushlya, V., et al. Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass. Wear, 2017, 376–377, 143–151. DOI: 10.1016/j.wear.2017.01.039. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.039

[5] Amaral, L., et al. Effect of lead on the machinability of brass alloys using polycrystalline diamond cutting tools. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2018. DOI: 10.1177/0309324718796384. https://doi.org/10.1177/0309324718796384

[6] Toulfatzis, A.I., et al. Final Heat Treatment as a Possible Solution for the Improvement of Machinability of Pb-Free Brass Alloys. Metals, 2018, 8, 575. DOI: 10.3390/met8080575. https://doi.org/10.3390/met8080575

[7] Stavroulakis, P., et al. Machinable Leaded and Eco-Friendly Brass Alloys for High Performance Manufacturing Processes: A Critical Review. Metals, 2022, 12, 246. DOI: 10.3390/met12020246. https://doi.org/10.3390/met12020246