

УДК 691.714

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.70.635

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДИСКІВ ПИЛОК ГАРЯЧОГО РІЗАННЯ МЕТАЛУ ШЛЯХОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

УЗЛОВ О. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,ДРОЖЕВСЬКА Г. В.², асист.,ПУЧИКОВ О. В.³, с. н. с.,ШПАК О. А.⁴, н. с.,СЛУПСЬКА Ю. С.⁵, аспір.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: oleg.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

² Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: ann.drozhevskaya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

³ Відділ конструкційних сталей, Інститут чорної металургії НАН України, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: alex.puchikov@gmail.com.

⁴ Відділ конструкційних сталей, Інститут чорної металургії НАН України, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: elenashpak58@gmail.com.

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: slupska.yuliia@pgasa.dp.ua

Анотація. *Мета дослідження* – визначити можливість підвищення експлуатаційної стійкості дисків пилок гарячого різання металу шляхом термічної обробки зубів пилок; розробити та впровадити у виробництво режим термічного зміцнення, який забезпечить підвищення експлуатаційної стійкості дисків пил гарячого різання металу. *Методика.* Структурний стан пилок гарячого різання досліджували за допомогою світлових мікроскопів Neophot-32 і Axiovert 200M MAT із програмним забезпеченням AxioVision 4.6.3. Оцінювання твердості зубів дисків пил гарячого різання металу виконували методом Віккерса, мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3. *Результати.* У промислових умовах випробувано 6 режимів термічної обробки зубів пилок гарячого різання металу. Розроблено технологію термічної обробки зубів таких пилок, яка дозволяє підвищити експлуатаційну стійкість дисків. *Наукова новизна.* Встановлено, що обдування зуба на всіх випробуваних режимах зменшує загальну глибину зони термічного впливу, перш за все за рахунок зниження глибини перехідної зони. Показано, що зменшення сили струму на всіх випробуваних режимах знижує глибину зони термічного впливу. Експериментально доведено, що збільшення площі контакту нагрівача і зуба істотно (в 1,5...2 рази) збільшує глибину зони термічного впливу. В основному це відбувається за рахунок збільшення глибини перехідної зони. При цьому дещо знижується твердість загартованої зони. Доведено, що більшість закономірностей, визначених раніше для структури дисків пилок холодного різання, вірні і для структури дисків пилок гарячого різання, незважаючи на істотно різні умови експлуатації. *Практична значимість.* Вдалося збільшити глибину загартованого шару зубів ППР до 80 % від висоти різального елемента. Однак, виходячи з умов технологічності переточки дисків під час експлуатації, глибину загартованої зони обмежили 40...50 % висоти зуба. Якість гарячого різання поліпшилась, кількість дефектів типу «задирика» та «наплив» суттєво зменшилася. Стійкість дисків ППР підвищилась як мінімум на 5 %.

Ключові слова: *диски пилок гарячого різання металу; ППР; термічна обробка; експлуатаційна стійкість; задирика; наплив; твердість; загартування*

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИСКОВ ПИЛ ГОРЯЧЕЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УЗЛОВ О. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,ДРОЖЕВСКАЯ А. В.², асист.,ПУЧИКОВ О. В.³, с. н. с.,ШПАК О. А.⁴, н. с.,СЛУПСЬКА Ю. С.⁵, аспір.

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: oleg.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: ann.drozhevskaya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

³ Отдел конструкционных сталей, Институт черной металлургии НАН Украины, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: alex.puchikov@gmail.com,

⁴ Отдел конструкционных сталей, Институт черной металлургии НАН Украины, пл. Стародубова, 1-а, 49005, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 41-22-991, e-mail: elenashpak58@gmail.com,

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: slupska.yuliia@pgasa.dp.ua

Аннотация. Цель исследования – определить возможность повышения эксплуатационной стойкости дисков пил горячей резки металла путем термической обработки зубьев пил; разработать и внедрить в производство режим термической обработки, обеспечивающий повышение эксплуатационной стойкости дисков пил горячей резки металла. **Методика.** Структурное состояние дисков пил горячей резки исследовали с помощью световых микроскопов Neophot-32 и Axiovert 200M MAT с программным обеспечением AxioVision 4.6.3. Оценка твердости зубьев дисков пил горячей резки металла выполняли по методу Виккерса, микротвердость определяли на приборе ПМТ-3. **Результаты.** В промышленных условиях опробованы 6 режимов термической обработки зубьев пил горячей резки металла. Разработана технология термической обработки зубьев таких пил, позволяющая повысить эксплуатационную стойкость дисков. **Научная новизна.** Установлено, что применение обдува зуба на всех испытанных режимах приводит к уменьшению общей глубины зоны термического влияния, прежде всего за счет снижения глубины переходной зоны. Показано, что уменьшение силы тока на всех испытанных режимах снижает глубину зоны термического влияния. Экспериментально доказано, что увеличение площади контакта нагревателя и зуба существенно (в 1,5...2 раза) увеличивает глубину зоны термического влияния. В основном это происходит за счет увеличения глубины переходной зоны. При этом несколько снижается твердость закаленной зоны. Доказано, что большинство закономерностей, определенных ранее для структуры дисков пил холодной резки, являются верными и для структуры дисков пил горячей резки, несмотря на существенно различные условия эксплуатации. **Практическая значимость.** Удалось увеличить глубину закаленного слоя зубов ППР до 80 % от высоты режущего элемента. Однако, исходя из условий технологичности переточки дисков во время эксплуатации, глубину закаленной зоны ограничили 40...50 % высоты зуба. Качество горячего реза улучшилось, количество дефектов типа «заусенец» и «наплыв» существенно уменьшилось. Стойкость дисков ППР повысилась как минимум на 5 %.

Ключевые слова: диски пил горячей резки металла; ППР; термообработка; эксплуатационная стойкость; задир; наплыв; твердость; закалка

SERVICE DURABILITY IMPROVEMENT OF HOT SAWS BY HEAT TREATMENT

UZLOV O.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

DROZHEVSKA H.V.³, *Assist.*,

PUCHYKOV O.V.³, *Senior Res.*,

SHPAK O.A.⁴, *Res.*,

SLUPSKA Yu.S.⁵, *Postgrad. Student*

¹ Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: oleg.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1329-5576

^{2*} Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: ann.drozhevskaya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5781-285X

³ Department of Constructional Steels, Institute of Ferrous Metallurgy of Academy of Sciences of Ukraine, 1-a, Starodubov sqr., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 41-22-991, e-mail: alex.puchikov@gmail.com

⁴ Department of Constructional Steels, Institute of Ferrous Metallurgy of Academy of Sciences of Ukraine, 1-a, Starodubov sqr., 49005, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 41-22-991, elenashpak58@gmail.com

⁵ Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-45, e-mail: slupska.yuliia@pgasa.dp.ua

Abstract. Purpose of the study. To determine the improvement potential of service durability of hot saws by heat treatment of saw teeth. To develop the optimal heat treatment modes in order to obtain the higher service durability of hot saws. To implement the optimal heat treatment mode into industrial practice of hot saw treatment. **Methodology.** Investigation of the structure of hot saws has been carried out using light microscopes Neophot 32 and Axiovert 200M MAT with AxioVision 4.6.3 software. The hardness of hot saw teeth has been assessed by Vickers method. Microhardness has been determined by PMT-3 test equipment. **Results.** It has been established that the use of blowing of saw tooth in all tested modes leads to a decrease in the total depth of the heat affected zone, primarily due to a decrease in the depth of the transition zone. It is shown that an amperage decrease in all the tested modes reduces the depth of the heat affected zone. It has been experimentally proved that an increase in the contact area between the heater and the tooth significantly (1.5...2 times) increases the depth of the heat affected zone. This is mainly due to an increase in the depth of the transition zone. In this case, the hardness of the quenched zone is slightly reduced. It is proved that most of the regularities previously defined for the structure of cold saw disks are also true for the structure of hot saw disks, despite significantly different operating conditions. **Practical significance.** It was possible to increase the depth of the hardened layer of hot saw teeth up to 80 % of the height of the cutting element. However, based on the manufacturability of the resizing of the disks during operation, the depth of the hardened zone was limited to 40...50 % of the height of the tooth. The quality of the hot cut has been improved; the number of defects of the "cuts" and "scoring" type has been decreased significantly. The durability of hot saw disks increased by at least 5 %.

Keywords: hot saw; heat treatment; service durability; "scoring" defect; "cut" defect; hardness; quenching

Постановка проблеми

Пили гарячого різання – одні з основних агрегатів у технологічній лінії отримання сортового прокату і від їх ефективної роботи безпосередньо залежить не тільки продуктивність прокатного стану, а і якість готової продукції.

На зуби пили діють різні за напрямком і величиною зовнішні сили. В результаті відбувається знос і деформація зуба. Зношування інструменту спричинює втрату його працездатності, тобто необхідність заміни або правки. Часта зміна різального інструменту тягне за собою втрату продуктивності обробки і знижує надійність роботи обладнання [1].

У процесі експлуатації диска гарячого різання за дії навантажень відбувається відшарування загартованої області зуба і пластична деформація решти різального елемента. Диски виходять із ладу через тріщини в западинах між зубами або в основі зубів. Будь-який вид руйнування вимагає заміни диска. Це викликає зниження продуктивності стану і підвищення витрати дисків. Проблема утворення задирок під час різання матеріалів широко відома і досі залишається

майже невирішеною як в Україні, так і за кордоном.

Тріщини також істотно впливають на стійкість пильних дисків. Тріщини в западинах зубів пили виникають через недоліки технологічного процесу виготовлення пили. Напруження розтягу, що виникають під час роботи пили, стають причиною зростання мікротріщин з утворенням магістральної тріщини. Це являє собою найбільш негативний знос пильного диска. Диск із виявленою тріщиною йде на переплавку [2]. Н. В. Таланов у своїй праці [3] звернув увагу на утворення тріщин як на результат налипання об'єму матеріалу на передню поверхню інструменту.

В умовах переривчастого різання, за високої адгезійної активності пари «опрацьований – інструментальний матеріал» причинами макросколів можуть бути збільшені в результаті налипання металу об'єми контактної (застійної) зони. Напруження розтягу, що виникають під час охолодження на передній поверхні по межі модифікованого контактного шару через різні коефіцієнти термічного розширення оброблюваного та інструментального матеріалів, провокують утворення мікротріщин.

Багато дослідників вивчали причини виникнення тріщин і умови роботи інструменту за впливу ударних навантажень [4]. У працях А. Л. Воронцова і А. Р. Гісметуліна [5; 6] було проведено моделювання процесу врізання інструменту в заготовку за допомогою кінцево-елементної імітаційної моделі. В результаті виявлено вплив переднього кута γ і кута нахилу головної різальної кромки λ на наростання сили різання [7]. Також у праці [8] досліджено напрямки підвищення стійкості матеріалу дисків пил, у тому числі і через відстежування трансформації структури диска під час експлуатації. Г. С. Андреев [9] широко досліджував вплив ударного навантаження на стійкість інструменту. В публікації [10] доведено, що найбільший вплив на стійкість інструменту чинить момент виходу інструменту в результаті відриву застійної зони від поверхні контакту і виникнення напружень розтягу.

Виявлено, що за переривчастого різання значну роль у руйнуванні інструменту відіграє утворення застійної зони на його контактних поверхнях у кінці періоду різання. Результатом циклічної зміни температури і значної різниці між її максимальними (під час роботи) і мінімальними (під час паузи) значеннями стають термічні і фазові напруги в зубах, які, сумуючись з експлуатаційними від діючих навантажень, перевищують межу міцності з утворенням тріщин. Розжарювальна сітка, радіальні тріщини, змінені навантаженнями твердість і структура, отримані за допомогою термообробки, змінюються [11; 12].

Спостерігається інтенсивний знос. Накопичення налиплої стружки в западинах між зубами спричинює утворення тріщин. Налипла стружка виключає зуб із процесу різання і механічне навантаження на наступні зуби зростає. Сильно нагріта в результаті тертя, перекрита стружкою ділянка зумовлює утворення сітки термічних тріщин [13]. Процес стружкоутворення змінюється пластичним

відтисненням зі збільшенням радіуса при вершині. Дослідження процесу на різних подачах з урахуванням радіуса округлення різальної кромки зуба пили дозволяє підтвердити залежність утворення задирок і зношення пил традиційної геометрії. Встановлено, що введення заднього кута зубів дозволяє знизити поверхню контакту з розігрітим металом, зменшити нагрівання вершини зуба пили і підвищити її стійкість за швидкості різання 100...120 м/с [2].

Пильні диски – це основне змінне обладнання, від надійності роботи якого залежить якість одержуваного сортового прокату. Термін служби дисків і якість різання багато в чому визначаються технологією виготовлення і підготовки їх до роботи. Технологія виготовлення дисків пил гарячого різання за останні роки практично не зазнала змін і не відрізняється від тієї, яка застосовувалася 30–40 років тому.

За кордоном проблема стійкості пил вирішується шляхом об'ємної термічної обробки диска, наприклад, продукція фірми Buehler успішно використовується у всьому світі. Але в українських умовах виробництва такі пили неприйнятні з економічної точки зору, через неможливість переточування диска, що, у свою чергу, робить використання об'ємно загартованих дисків пил економічно не обґрунтованим.

Таким чином, із вищенаведеного випливає, що найважливіші показники ефективності процесу різання – це стійкість пильного диска і якість торця металопрокату. Наявність задирок на торцях металопрокату викликає значне збільшення технологічних витрат під час подальшої обробки. З урахуванням проведеного аналізу існуючих результатів досліджень з теми, що розглядається, можна зробити висновок, що на сьогоднішній день в літературі немає прийнятного рішення проблеми ліквідації великих задирок у процесі різання готового гарячого металопрокату і підвищення стійкості зубів дискових пил, з урахуванням економічно доцільного виготовлення дисків пил. Проблема підвищення стійкості пил

холодного різання була розглянута раніше [14].

Результати досліджень

Порізка прокату в потоці стану 650 здійснюється пилами гарячого різання (ПГР), які виготовляються згідно з кресленням 05574-6 зі сталі 50. Дата розроблення креслення – 1998 рік. Диски пил виготовляються з листового прокату товщиною 11 мм згідно з ГОСТ 19903. Профіль зуба та основні геометричні параметри дисків пил гарячого різання наведені на рисунку 1 та в таблиці 1.

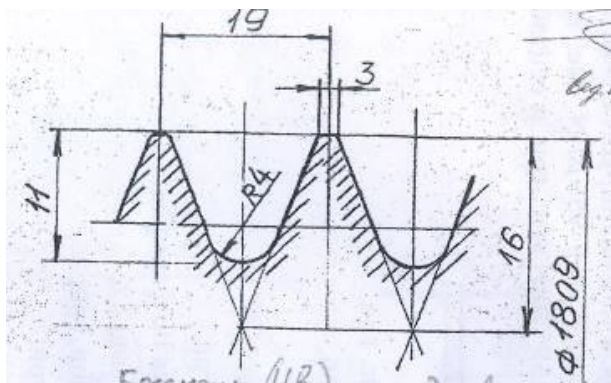


Рис. 1. Профіль зуба ПГР згідно з кресленням 05574-6

Таблиця 1

Основні параметри дисків ПГР

№ зп	Переточки	Кількість зубів Z	Крок t, мм	Діаметр диска D, мм
1	Новий диск	300	19	1809
2	I переточка	286	19	1724
3	II переточка	272	19	1642

Термічне зміцнення зубів диска здійснюється згідно з ПТИ 232-137-200-2015 на гартувальному станку після заточки зубів. При цьому з двох протилежних сторін диска підводяться графітові електрошестерні. Поворот диска та гартування проводиться автоматично. Сила струму у вторинній обмотці понижувального трансформатора для ПГР №1-6 дорівнює 1 600 А, а для ПГР №7 – 1 500 А. Час контакту зубів з електродами приблизно 5...6 секунд. Твердість загартованої поверхні зубів повинна бути 55–58 HRC. Швидкість охолодження зубів під час гартування в документації не обумовлюється.

Загальний вигляд поверхні зуба пили гарячого різання після гарту за існуючою технологією показано на рисунках 2 та 3.

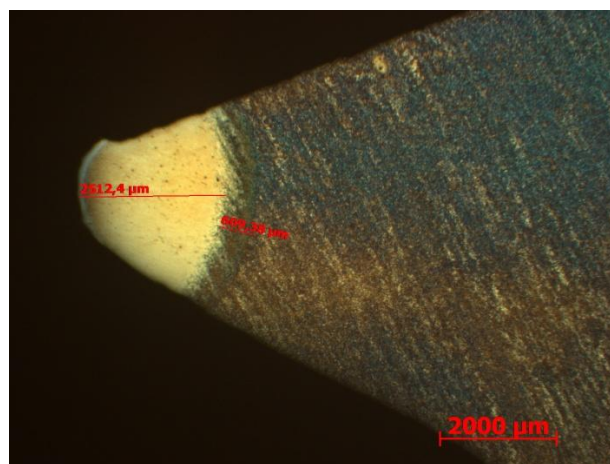


Рис. 2. Загальний вигляд поверхні зуба пили гарячого різання після гарту за існуючою технологією, × 12,5



Рис. 3. Загальний вигляд зуба і поверхні диска пили гарячого різання. Колаж

Більш детальний вигляд структури загартованого шару наведено на рисунку 4.

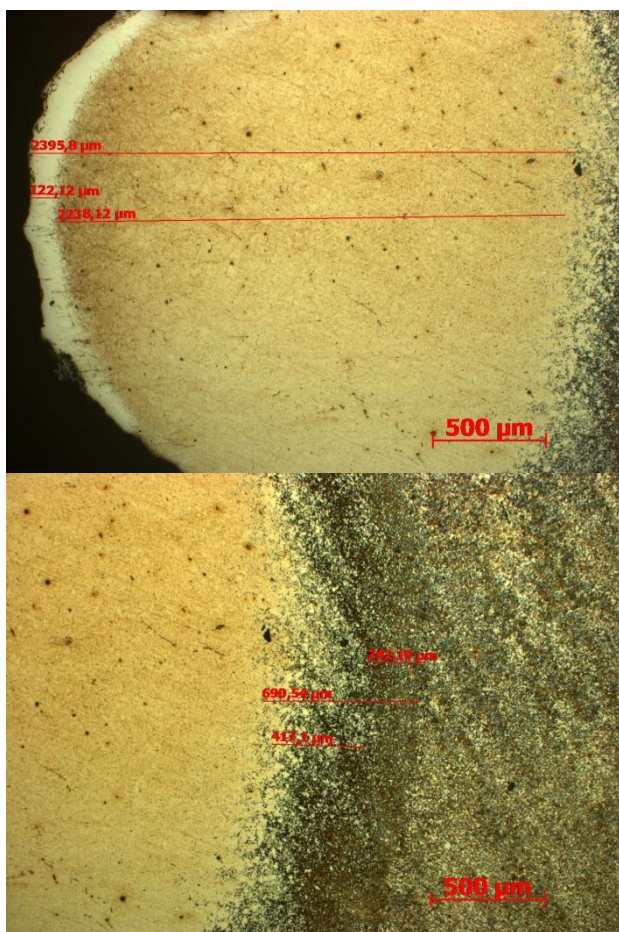
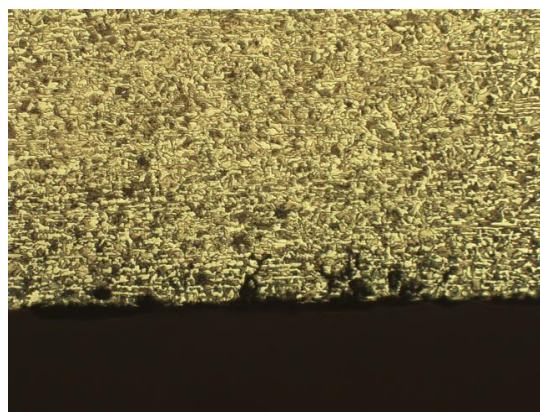


Рис. 4. Детальний вигляд загартованого шару зуба пили гарячого різання

Як видно з рисунка 4, на поверхні спостерігається тонкий так званий «білий шар». Загальна глибина загартованого шару не перевищує 2,5 мм. Існуюча технологія термічного зміцнення зубів пили гарячого різання забезпечувала формування загартованої зони глибиною до 2,5 мм ($\approx 20\%$ висоти зуба), дуже тонкої, до 1,0 мм, перехідної зони. Далі йшла гарячекатана феритно-перлітна структура. Мікротвердість при цьому змінювалася від 720...830 МПа в загартованій зоні, 400...490 МПа в перехідній і 215...225 МПа в гарячекатаній структурі. Високі значення мікротвердості «білого шару» свідчать, що ці ділянки є швидше за все ділянками мартенситу, що утворилися в процесі експлуатації. Такі ділянки мають високу крихкість, що спричинює утворення мікротріщин в самому «білому шарі» і на межі «білий шар» /

основний метал. Таким чином ділянки «білого шару» легко відшаровуються від основного металу диска. Загалом же структура по перерізу диска являє собою феритно-перлітну суміш без видимих слідів термічного зміцнення

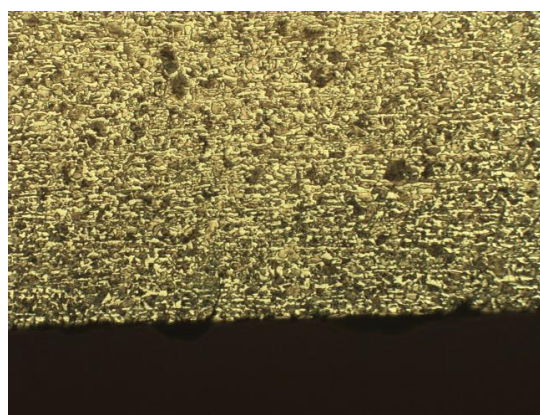
Металографічні дослідження також виявили істотні відмінності в мікроструктурі різних поверхонь зуба (рис. 5).



× 100

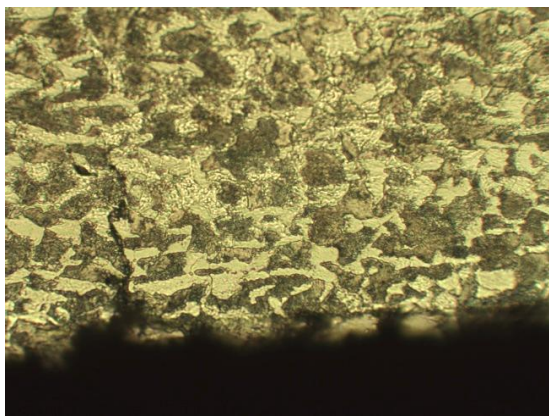


× 400



× 100

а) Перша поверхня (більш деформована, в вищербинах і мікротріщинах)



× 400

б) друга поверхня

Рис. 5. Мікроструктура обох поверхонь диска в районі зуба

Така відмінність може бути пов'язана з різним характером роботи кромки диска під час зустрічі з профілем. Також це може побічно свідчити про биття диска у процесі експлуатації.

Аналіз існуючої на комбінаті технології виробництва і термічної обробки пил показав, що в процесі експлуатації диска пили гарячого різання за дії високих динамічних і теплових навантажень відбувається відшарування або викришування загартованої області зуба і пластична деформація решти різального елемента. Деформація зуба може досягати значних величин і мати симетричний або асиметричний «грибоподібний» вигляд і загин зуба в бік прикладеного навантаження (рис. 6).

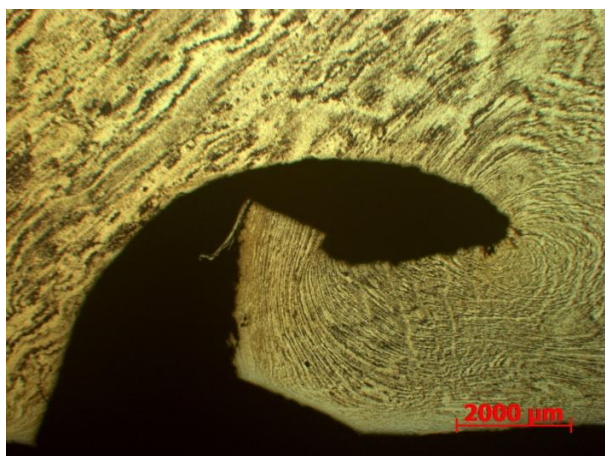


Рис. 6. Зношений і деформований зуб пили гарячого різання, ×12,5

Таким чином, за існуючої технології виготовлення і термообробки дисків пил можливі два варіанти зносу зубів:

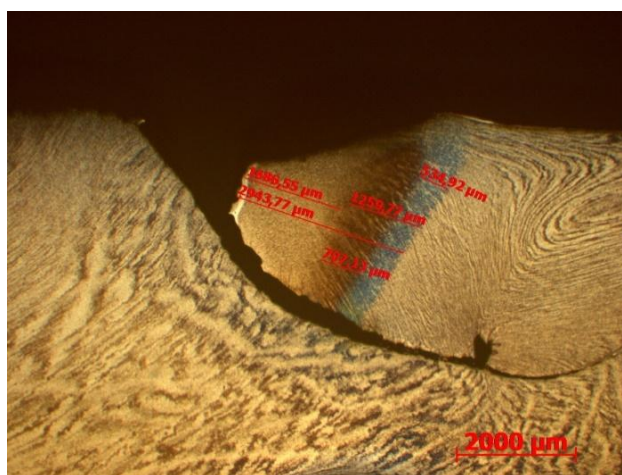
1) викришування загартованої області зуба;

2) загин (деформація) зуба.

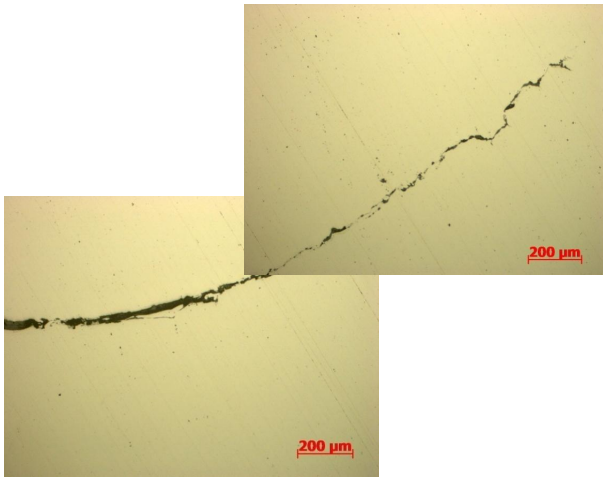
Після викришування загартованої області зуба різання прокату здійснюється відносно м'якою частиною зуба з феритно-перлітною структурою. Це може зумовлювати утворення такого виду дефекту як наплив. Він може утворюватися через недостатню твердість зношених зубів і процес різання набуває фрикційного характеру.

У разі відхилення зубів від первісної форми (загин або деформація) можливе утворення таких дефектів як задирка, особливо якщо згин зуба відбувається нерівномірно щодо поверхонь диска і поєднується із загальним вигином диска пили гарячого різання через недостатню товщину диска (менше нормативної) і за великих подач у процесі різання.

Металографічним контролем зношених зубів дисків пили гарячого різання виявлено тріщини напруги в районі кореня зуба (рис. 7). Такий розвиток тріщин для дисків пили гарячого різання досить характерний.



а) × 12,5



б) $\times 100$

Рис. 7. Загальний вигляд зношеного зуба (а), з тріщиною напруження в корені зуба (б)

Коригування існуючої технології термічної обробки пил

Після аналізу існуючої на комбінаті технології виробництва і термічної обробки пил вирішено виконати низку експериментів, які полягали в:

1. оцінюванні впливу обдування зуба під час гартування на структуру і властивості загартованих зубів;

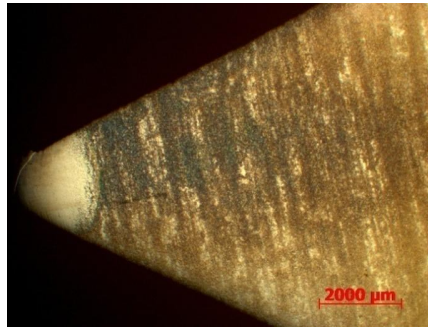
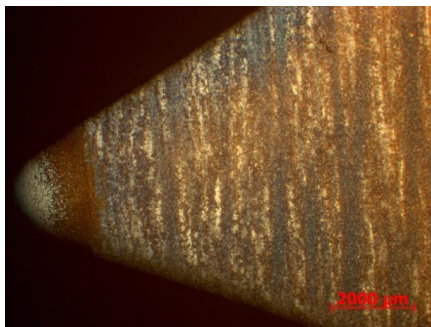
2. оцінюванні впливу зменшення сили струму під час нагрівання зуба від гартування;

3. оцінюванні впливу збільшення площі контакту поверхні зуба з нагрівачем.

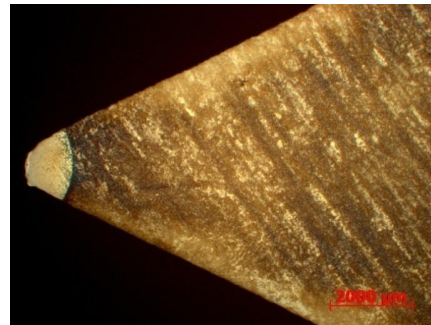
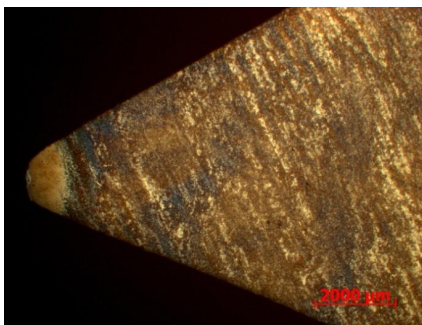
Результати експериментів наведені на рисунку 8.

Без обдування повітрям

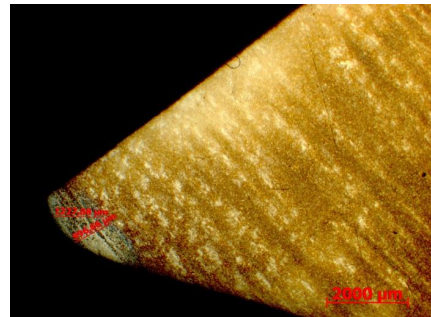
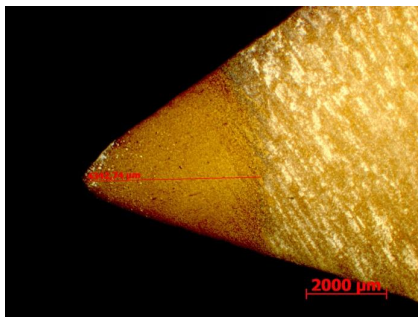
З обдуванням повітрям



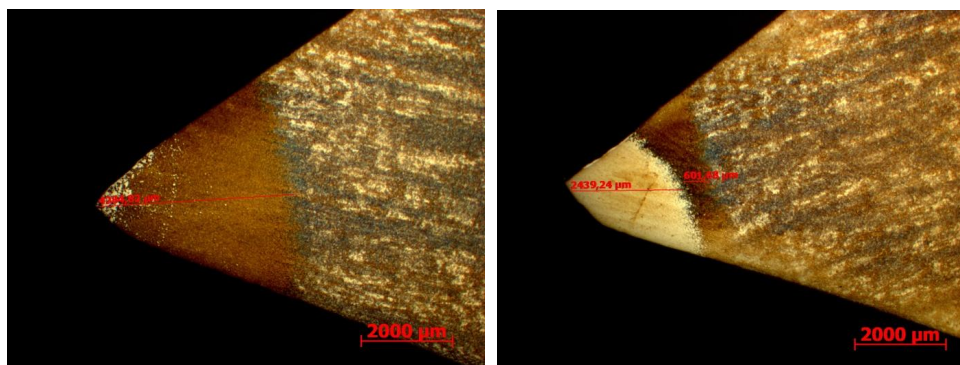
а) За існуючою технологією



б) За існуючою технологією. Сила струму зменшена



в) Глибина канавки 3 мм



г) Глибина канавки 4 мм

Рис. 8. Загальний вигляд зубів після термічної обробки за різними режимами (а – г), ×12,5

Світла область - мартенсит гарту, темна область - перехідна зона. Далі феритно-перлітна структура зуба, що не зазнала

термічної дії. Результати вимірювання глибин зон і твердість структурних складових наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Глибина зон термічного впливу та твердість зубів пили гарячого різь

Без обдування повітрям				З обдуванням повітрям			
Термічна обробка	Глибина загартованої зони, мм/ (твердість, HRC)	Глибина перехідної зони, мм/ (твердість, HRC)	Загальна глибина термічного впливу, мм/ (твердість, HRC)	Термічна обробка	Глибина загартованої зони, мм/ (твердість, HRC)	Глибина перехідної зони, мм/ (твердість, HRC)	Загальна глибина термічного впливу, мм/ (твердість, HRC)
Існуюча технологія (а)	1,4 (60,1...45,3)	1,2 (45,3...27,8)	2,6 (60,1...27,8)	Існуюча технологія (а)	1,9 (60,1...47,7)	0,2 (47,7...38,8)	2,1 (60,1...38,8)
Існуюча технологія зі зменшеною силою струму (б)	1,0 (62,5...54,7)	0,5 (45,3...32,2)	1,5 (62,5...32,2)	Існуюча технологія зі зменшеною силою струму (б)	0,9 (61,8...49,1)	0,2 (49,1...40,8)	1,1 (61,8...40,8)
Глибина канавки 3 мм (в)	0,5 (45,3...34,4)	3,0 (34,4...25,6)	3,5 (45,3...25,6)	Глибина канавки 3 мм (в)	0,5 (60,1...49,1)	0,3 (49,1...35,5)	0,8 (60,1...35,5)
Глибина канавки 4 мм (г)	0,5 (61,8...41,8)	3,8 (41,8...27,8)	4,3 (61,8...27,8)	Глибина канавки 4 мм (г)	2,4 (60,1...59,2)	0,6 (27,1...22,2)	3,0 (60,1...22,2)

Як впливає з аналізу рисунка 8 і даних таблиці 2, охолодження зуба в процесі термічної обробки зумовлює отримання тонкої перехідної зони (0,2...0,6 мм) між загартованою і феритно-перлітною зонами зуба. Це, у свою чергу, може викликати підвищення структурних напружень у перехідній зоні зуба і підвищення ймовірності зламу зуба в цій області в процесі експлуатації. Наявність обдуву у всіх випадках істотно звужує перехідну

зону, тим самим підвищуючи рівень напружень у зубі.

Також з аналізу рисунка 8 і таблиці 2 впливає, що у разі реалізації швидкостей вище критичних у зубі максимально досяжна твердість складає близько 60...62 HRC. Твердість перехідної зони сильно варіюється, але взагалом можна вважати, що в діапазоні 45...25 HRC.

Із метою збільшення глибини загартованого шару була зроблена спроба збільшити площу контакту нагрівача з

поверхнею зуба за рахунок використання канавки на нагрівачі глибиною 3 та 4 мм. У результаті за глибини канавки 3 мм отримали суттєве збільшення глибини зони термічного впливу до 3,5 мм (без обдування). З обдуванням на цих зразках глибина становить 0,8 мм (можливо, через особливості проведення експерименту).

Твердість на поверхні зразків без обдування знизилася до 45...35 HRC, що свідчить про швидкості охолодження нижче критичних. У той же час різко збільшилася глибина перехідної зони. Збільшення глибини канавки до 4 мм викликало подальше збільшення загальної глибини зони термічного впливу. В основному це реалізується за рахунок збільшення глибини перехідної зони до 3,8 мм. Застосування обдування зумовило збільшення глибини загартованого шару з 0,5 до 2,4 мм і різке зниження глибини перехідної зони до 0,6 мм. Загалом же зона термічного впливу під час охолодження з обдуванням зменшилася.

Висновки

1. Застосування обдування зуба на всіх випробуваних режимах викликає зменшення загальної глибини зони термічного впливу, перш за все за рахунок зниження глибини перехідної зони.

2. Зменшення сили струму на всіх випробуваних режимах знижує глибину зони термічного впливу.

3. Збільшення площі контакту нагрівача і зуба істотно (в 1,5...2 рази) збільшує глибину зони термічного впливу. В основному це відбувається за рахунок збільшення глибини перехідної зони. При цьому дещо знижується твердість загартованої зони.

У процесі виконання роботи на існуючому обладнанні ділянки підготовки дисків пил КПЦ випробувано 6 нових режимів термічного зміцнення. При цьому варіювались сила струму на нагрівальних елементах, час нагріву, обдування повітрям різальних елементів, площа контакту нагрівального елемента з поверхньою зуба.

Вдалося збільшити глибину загартованого шару зубів ППР до 80 % від висоти різального елемента.

Однак, виходячи з умов технологічності переточки дисків під час експлуатації, глибину загартованої зони обмежили 40...50 % висоти зуба. Диски ППР зі збільшеною глибиною загартованого шару різального елемента масово використовуються у КПЦ в даний час. Якість гарячого різання поліпшилась, кількість дефектів типу «задирок» та «наплив» суттєво зменшилася. Стійкість дисків ППР підвищилася як мінімум на 5 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Насад Т. Г. Высокоскоростная обработка с тепловым воздействием: монография. Саратовский государственный технический университет, 2007. 108 с.
2. Банников А. И. Совершенствование процесса резания горячего металлопроката дисковыми пилами на основе управления теплофизическими явлениями в контактной зоне : дисс. д-ра техн. наук : 05.02.07. Волгоград, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 2018. 306 с.
3. Таланов Н. В. Физические основы процесса резания. *Физические процессы при резании металлов*. 1984. С. 3–37.
4. Банников А. И. Теоретические основы модернизации пил ударного реза горячего проката : монография. Волгоград : ВолГТУ, 2014. 108 с.
5. Воронцов А. Л., Албагачиев А. Ю., Султан-заде Н. М. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол : ТНТ, 2014. 552 с.
6. Гисметулин А. Р., Горбунов И. В., Ефременков И. В. Разработка препроцессора для моделирования операций механообработки в САЕ системе LS-DYNA. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 1 (5). С. 1338–1342.
7. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочность твердых тел. Москва : Металлургия, 1971. С. 141–149.
8. Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. Шляхи відстежування трансформацій мікроструктури матеріалу, які відбуваються внаслідок його знос. *Шостий міжнародний симпозіум українських інженерів-*

механіків у Львові : тези доповідей. За заг. ред. к. т. н., доц. Б. І. Кіндрацького. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2003. С. 145–146.

9. Андреев Г. С. Тепловые явления в режущей части инструмента при прерывистом резании. *Вестник машиностроения*. 1973. № 3. С. 69–73.

10. Плахотник В. А., Конская А. А. Определение температурного поля в поверхностном слое заготовки при термофрикционном резании. *Вестник СХУ им. Давя*. 2013. №. 4 (2). С. 150–152.

11. Дальский А. М. Справочник технолога–машиностроителя : в 2 т; под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. 5-е изд., испр. Мшсква : Машиностроение, 2010. Т. 1. 912 с.

12. Калиновский В. Р. Технология горячей обработки металлов. Минск : ИВЦ Минфина, 2008. 352 с.

13. Банников А. И., Дятлов Н. А., Пермьяков И. Л., Антонов А. С. Металлографическое исследование стружки при ударной резке горячего проката. *СТИН*. 2014. № 4. С. 19–20.

14. Узлов О. В., Дрожжевська Г. В., Пучиков О. В., Гречка І. С. Підвищення ресурсу експлуатації дисків пил холодного різання металу шляхом термічної обробки. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4 (87). С. 10–16. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.241219.10.595

REFERENCES

1. Nasad T.G. *Vysokoskorostnaya obrabotka s teplovym vozdeystviyem* [High speed heat treatment : monograph]. Saratovskiy State Technical University, 2007. 108 p. (in Russian).

2. Bannikov A.I. *Sovershenstvovaniye protsessa rezaniya goryachego metalloprokata diskovymi pilami na osnove upravleniya teplofizicheskimi yavleniyami v kontaktной zone: dissertatsiya doktora Tekhnicheskikh nauk: 05.02.07* [Improving the process of cutting hot metal by circular saws based on the management of thermophysical phenomena in the contact zone: diss. Dr. Sc. (Tech.) : 05.02.07]. Volhohrad : FGBOU VO “Volhohradskiy State Technival University”, 2018, 306 p. (in Russian).

3. Talanov N.V. *Fizicheskiye osnovy protsessa rezaniya* [The physical basis of the cutting process]. *Fizicheskiye protsessy pri rezanii metallov* [Physical processes in metal cutting]. 1984, pp. 3–37. (in Russian).

4. Bannikov A.I. *Teoreticheskiye osnovy modernizatsii pil udarnogo reza goryachego prokata: monografiya* [Theoretical Foundations for the Modernization of Hot-Impact Saw Cutting Saws : monograph]. Volhohrad : VolhSTU, 2014, 108 p. (in Russian).

5. Vorontsov A.L., Albagachiyev A. Yu. and Sultan–zade N.M. *Teoreticheskiye osnovy obrabotki metallov v mashinostroyenii* [Theoretical foundations of metal processing in mechanical engineering]. Staryy Oskol : TNT, 2014, 552 p. (in Russian).

6. Gismetulin A.R., Gorbunov I.V. and Yefremenkov I.V. *Razrabotka preprotssora dlya modelirovaniya operatsiy mekhanoobrabotki v SAYe sisteme LS–DYNA* [Development of a preprocessor for modeling machining operations in the SAELS–DYNA system]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 16, no. 1 (5), pp. 1338–1342.

7. Yekobori T. *Fizika i mekhanika razrusheniya i prochnost' tverdykh tel* [Physics and mechanics of fracture and solid strength]. Moscow : Metallurgiya, 1971, pp. 141–149. (in Russian).

8. V.I. Bol'shakov, V.M. Volchuk and Yu.I. Dubrov. *Shlyakhy vidstezhuvannya transformatsiy mikrostruktury materialu, yaki vidbuvayut'sya vnaslidok yoho znos* [Ways to track the transformation of the microstructure of a material due to its wear]. *Shostyy mizhnarodnyy sympozium ukrayins'kykh inzheneriv-mekhanikiv u L'vovi: tezy dopovidey* [Sixth International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv: Abstracts]. Edited by Cand. Sc. (Tech.), Dr. B.I. Kindrats'kyi. L'viv : KINPATRI LTD, 2003, pp. 145–146. (in Ukrainian).

9. Andreyev G.S. *Teplovyeye yavleniya v rezhushchey chasti instrumenta pri preryvistom rezanii* [Thermal phenomena in the cutting part of the tool during intermittent cutting]. *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of mechanical engineering]. 1973, no. 3, pp. 69–73.

10. Plakhotnik V.A. and Konkskaya A.A. *Opredeleniye temperaturnogo polya v poverkhnostnom sloye zagotovki pri termofriktsionnom rezanii* [Determination of the temperature field in the surface layer of a workpiece during thermofriction cutting]. *Vestnik SNU imeni Davya* [Bulletin of SNU named after Dahl]. 2013, no. 4 (2), pp. 150–152.

11. Dal'skiy A.M. *Spravochnik tekhnologa–mashinostroitelya* [Handbook of a mechanical engineer]. In 2 vol. Edited by A.M. Dal'skiy, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov, A.G. Suslov. Moscow : Mashinostroyeniye, 2010, vol. 1, 912 p. (in Russian).

12. Kalinovskiy V.R. *Tekhnologiya goryachey obrabotki metallov* [Hot metal processing technology]. Minsk : IVTs Minfina, 2008, 352 p. (in Russian).

13. Bannikov A.I., Dyatlov N.A., Permyakov I.L., Antonov A.S. *Metallograficheskoye issledovaniye struzhki pri udarnoy rezke goryachego prokata* [Metallographic study of shavings during impact cutting of hot rolled products]. *СТИН* [Steel & Instruments]. 2014, no. 4, pp. 19–20. (in Russian).

14. Uzlov O.V., Drozhevs'ka H.V., Puchykov O.V. and Hrechka I.S. *Pidvyshchennya resursu ekspluatatsiyi dyskiv pyl kholodnoho rizannya metalu shlyakhom termichnoyi obrobky* [Increasing the service life of cold-cut metal saw blades by heat treatment]. *Metaloznastvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. No. 4 (87), 2019, pp. 10–16. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.02.2020 р.