

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. №2 (128). С. 44-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №2 (128). P. 44-48.

Научная статья
УДК 621.9
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-44-48

Исследование нагрева зуба традиционной пилы пакетного резания с использованием металлографического анализа

Ольга Александровна Макарова, к.т.н.
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия
olgamakarova5024@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2672-136X>

Аннотация. Приведены результаты исследования изменения структуры зубьев пилы пакетного резания, используемой при резании холодного металлопроката. Проведенное металлографическое исследование и моделирование с использованием метода конечных элементов позволяют определить температуру нагрева зубьев и прогнозировать изменение геометрии режущей части зубьев, обеспечивающее повышение стойкости инструмента.

Ключевые слова: пакетная резка, нагрев зубьев, структура материала

Для цитирования: Макарова О.А. Исследование нагрева зуба традиционной пилы пакетного резания с использованием металлографического анализа // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №2 (128). – С. 44-48.
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-44-48.

Original article

Investigation of heating of a traditional batch saw tooth using metallographic analysis

Olga A. Makarova, Can. Sn. Tech.
Volograd State Technical University, Volgograd, Russia
olgamakarova5024@gmail.com

Abstract. The results of the study of changes in the structure of a batch saw teeth used for cutting cold rolled stock are given. Conducted metallographical test and modeling by using the finite element method make it possible to determine the heating temperature of the teeth and predict a change in the geometry of the cutting part of the teeth, providing tool durability increase.

Keywords: batch cutting, tooth heating, material structure

For citation: Makarova O.A. Investigation of heating of a traditional batch saw tooth using metallographic analysis / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, No.2 (128), pp. 44-48. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-44-48.

Введение

Дисковыми салазковыми пилами пакетного резания на АО «ВТЗ» разрезают холодный трубопрокат из углеродистой и нержавеющей стали на мерные заготовки перед отправкой потребителю. Исследование процесса резания проката дисковыми пилами и анализ влияния геометрии на стойкость инструмента проводилось в работе [1].

Так как процесс резания происходит с малыми подачами $S = 0,005 \dots 0,2$ м/с и большими скоростями $v = 113 \dots 122$ м/с, то толщина среза составляет $0,4 \dots 10$ мкм, что определяет процесс резания как термофрикционный [1]. При контакте с трубой пильный диск разогре-

вает слой обрабатываемого металла до температур, близких к температуре плавления. Разогретый слой материала затем удаляется последующими зубьями из зоны резания, в основном в виде мелкой пыли. При контакте зубьев пилы с разогретым обрабатываемым материалом происходит нагрев вершины зубьев до значительных температур. Это приводит к пластической деформации зубьев пилы и потери стойкости. На рис. 1 показаны сегменты новой (не работавшей) и изношенной пилы. Наблюдается практически полная потеря режущей способности.

Наибольший износ наблюдается при разрезании проката из коррозионно-стойких сталей 08X13, 12X13. Эти стали характеризуются по

ниженной теплопроводностью. Все это говорит о доминирующем влиянии тепловых процессов при износе инструмента.

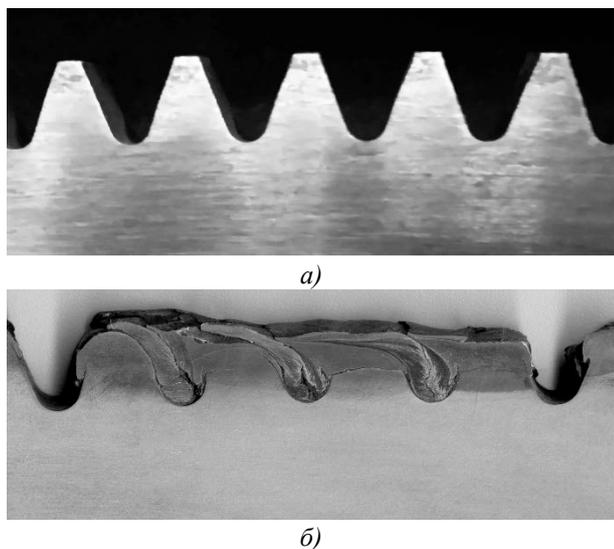


Рис. 1. Общий вид сегмента диска пилы:
a – новая пила с традиционным профилем; *б* – пила с деформированным профилем

Цель исследования

Основной проблемой пакетной резки дисковыми пилами является недостаточная стойкость инструмента. Для повышения стойкости и определения механизма износа инструмента проводились исследования микроструктуры металла зубьев пилы. Контакт зуба с разогретым металлом в зоне обработки вызывает структурные изменения в инструменте, что позволяет определить температуру нагрева рабочей части зубьев и охарактеризовать условия работы инструмента.

Материал и методы исследования

Материал инструмента сталь 50ХГФА. Металлографические исследования шлифов зубьев проводились после травления 4 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты (ниталем). Использовался материаловедческий агрегатный микроскоп OLYMPUS-BX61 при увеличениях от $\times 50$ до $\times 500$. Фотографирование структуры производилось цифровой камерой DP-12, затем осуществлялась обработка электронного изображения пакетом программ AnaliSyS.

Для определения структуры материала производилось измерение микротвёрдости на микротвердомере ПМТ-3 под нагрузкой 1,0 Н.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве первого объекта металлографического исследования использовался сегмент новой пилы пакетной резки с традиционным профилем для холодного трубопроката (см. рис. 1, *a*). На макрошлифе новой (не работающей) пилы металлографическому исследованию подвергались две зоны: основание зуба и периферия зуба (см. рис. 1, *a*, рис. 2, *a*). Структура материала основания зуба пилы – сорбит отпуска, представлена на рис. 2, *a*.

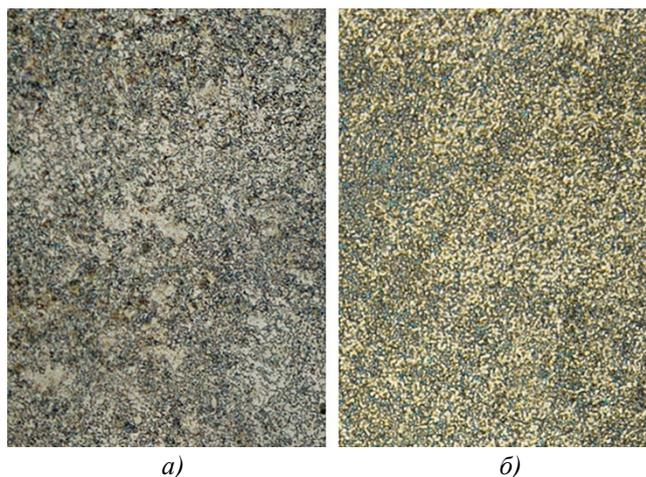


Рис. 2. Структура материала новой пилы с традиционным профилем:
a – основания зуба пилы (сорбит отпуска, $\times 500$);
б – вершины зуба пилы (троостомартенсит, $\times 500$)

Измерения твердости материала показали значения 2,5...3,0 ГПа. На периферии зуба (см. рис. 2, *б*) наблюдается структура троостомартенсит с выделениями карбидов. Твердость материала равна 4,0...5,5 ГПа. Вершина зуба пилы имеет большую твердость, чем основание зуба, вследствие предварительной термообработки материала 50ХГФА: закалке и низкому отпуску на глубину до 2,5...3 мм.

На рис. 1, *б* в качестве второго объекта металлографического исследования представлен сегмент традиционной дисковой пилы пакетной резки с характерным износом зубьев. Вследствие воздействия значительных температур и усилий при резании вершины зубьев сильно деформированы, по обеим сторонам зубьев образуются наплывы сложной формы. На отдельных зубьях при вершине образуются протяженные трещины. Из обрабатываемого материала, налипшего на заднюю поверхность зубьев, происходит образование модифицированного контактного слоя (нароста). Многочисленные слои нароста могут полностью за-

полнять впадины между зубьями.

На макрошлифе зубьев различимы две основные зоны: деформированная периферия зуба с образовавшимися наплывами при вершине и основание зуба. В нижней части зуба наблюдается структура сорбита отпуска и зернистого перлита, что подтверждается проведенными на этом участке измерениями микротвёрдости. Микротвёрдость этого участка равна 2,5...3,5 ГПа.

При контакте инструмента с обрабатываемым материалом происходит быстрый нагрев вершины зуба, а затем ее охлаждение за счет оттока тепла в холодный металл пилы после выхода из зоны резания. Нагрев приводит к собирательной рекристаллизации материала инструмента, укрупнению зерна, что вызывает потерю прочности и изменение структуры (рис. 3). По изменению структуры можно судить, что вершина зуба пилы нагревается выше 900 °С.



Рис. 3. Структура материала в деформированной части материала зуба ($\times 100$)

Под действием высокой температуры и силы резания в зоне обработки часть материала зуба деформируется и оттесняется в область впадины (см. рис. 3). В деформированной области происходит формирование наплыва. Наплыв отделен от основной части полостью, заполненной окислами. При этом на некоторых зубьях образуется трещина, вызванная усталостными процессами. На рис. 3 наблюдаются линии деформирования металла, обусловленные ориентацией неметаллических включений вдоль волокон. В деформированной части зуба микротвёрдость наплыва равна 3,0...3,5 ГПа, что соответствует структуре сорбита.

Микрошлиф модифицированного контактного слоя (нароста) из нержавеющей стали представлен на рис. 4.

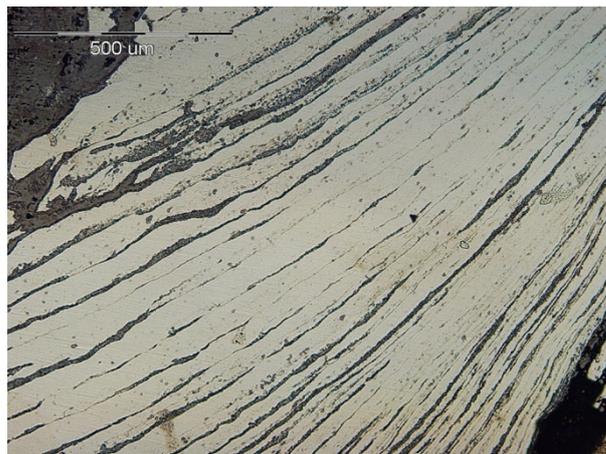


Рис. 4. Структура слоев обрабатываемого материала в наросте ($\times 100$)

Образование этой структуры на задней поверхности инструмента связано с периодичностью процесса резания. После выхода из зоны контакта зуб охлаждается и уже достаточно остывшим входит в зону резания. Происходит быстрое охлаждение тонкого слоя металла, соприкасающегося с поверхностью инструмента. Этот тонкий слой интенсивно упрочняется, отрывается от основной массы и остается на поверхности инструмента.

Окислы разделяют слои нароста и могут достигать значительной толщины. Наличие окислов подтверждает высокие температуры в зоне резания. Неравномерная структура модифицированного контактного слоя обусловлена периодичностью процесса резания и «сползанием» нароста с задней поверхности инструмента (см. рис. 4).

Рассмотрим участок периферии зуба (рис. 5).

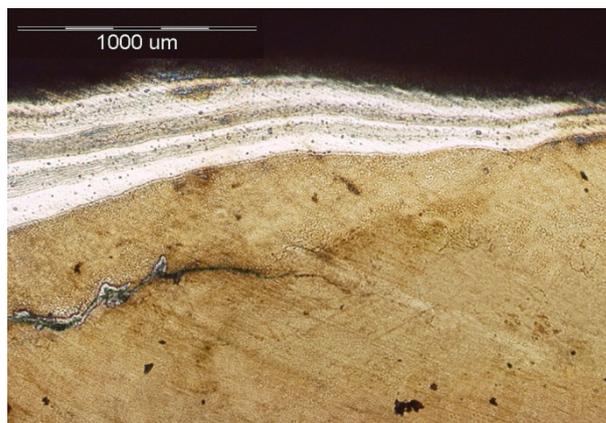


Рис. 5. Микрошлиф материала зуба на периферии зуба под наростом ($\times 50$)

Под модифицированным контактным слоем из нержавеющей стали выявляется участок мелкозернистого троостита с ферритными

участками. Такая структура образуется при нагреве металла задней поверхности зуба выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и быстром его охлаждении. Наличие ферритных участков в приповерхностном слое троостита связано с тем, что сталь не успевает полностью перейти в аустенитное состояние при повышенных температурах (рис. 6). Это говорит о том, что этот участок зуба подвергается периодическому интенсивному нагреву и быстрому охлаждению.

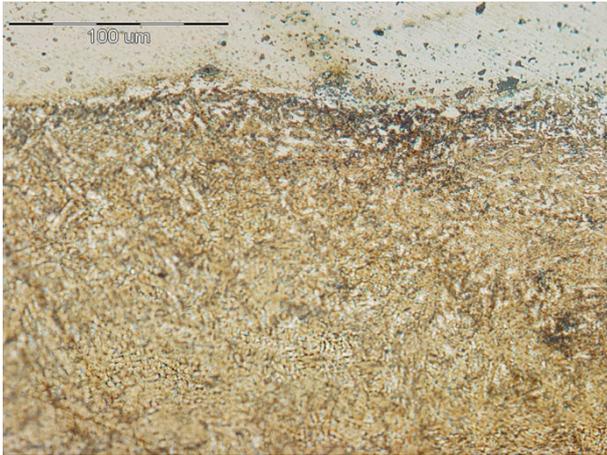


Рис. 6. Микроструктура материала зуба под нагрузкой (троостит с ферритными участками, $\times 500$)

Для уменьшения нагрева зуба предлагается модификация геометрии режущей части инструмента введением заднего угла α и фаски f при вершине. Ранее в работах [2, 3] был выполнен аналитический расчет температурных полей при нагреве зубьев пилы пакетной резки. Уменьшение длины контакта по задней поверхности зуба должно привести к уменьшению нагрева инструмента.

Применение научного программного обеспечения для исследования внутренних напряжений и температурных полей позволяет исследовать влияние параметров обработки и прогнозировать оптимальные параметры геометрии инструмента. Результаты подобных исследований для дисковых пил термофрикционного резания горячего проката представлены в работах [4, 5].

Для определения величины нагрева вершины зуба с новой геометрией в сравнении с традиционным зубом было использовано моделирование тепловых процессов в программной системе MSC Marc с использованием метода конечных элементов.

Моделирование распределения тепловых полей находилось с помощью решения плоской нестационарной задачи на одном зубе.

Производилось нагружение зуба пилы известным тепловым потоком за 30 циклов (оборотов пилы). Изменение теплофизических характеристик материала инструмента от температуры, а также прерывистый характер обработки учитывались при задании параметров нагружения модели.

На рис. 7 представлено сравнение распределение тепловых потоков в зубе пилы с традиционной формой зубьев и с модифицированной геометрией ($\alpha = 5^{\circ}$, фаска при вершине $f = 0,75\text{ мм}$).

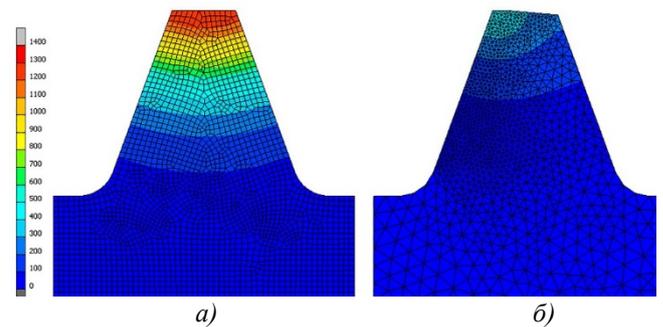


Рис. 7. Распределение температурных полей в зубе: а – пила с традиционной геометрией ($\alpha = 0^{\circ}$); б – пила с модифицированной геометрией ($\alpha = 5^{\circ}$, фаска при вершине $f = 0,75\text{ мм}$)

Вследствие контакта с металлом, разогретым до высоких температур, близких к температуре плавления обрабатываемого материала ($1350\text{...}1550\text{ }^{\circ}\text{C}$), вершина зуба интенсивно нагревается. При резании пилой с традиционной формой зубьев и задним углом $\alpha = 0^{\circ}$, нагревается вся задняя поверхность (см. рис. 7, а). При выходе зуба из зоны резания, тепловой поток распределяется в тело пилы, вершина зуба несколько охлаждается, затем цикл повторяется.

В конце реза через тридцать циклов задняя поверхность зуба нагревается до $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вершина зуба прогревается до температуры выше температуры $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубину более $2,5\text{ мм}$. Этим обусловлено значительное снижение прочности материала инструмента, интенсивная пластическая деформация зуба и катастрофический износ пилы.

При нагреве режущей части инструмента с модифицированной геометрией происходит значительное уменьшение длины контакта. Вследствие этого уменьшается тепловой поток в зуб пилы. Вершина зуба пилы нагревается не более чем до $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 7, б). За время реза процессы рекристаллизации и отпуска не успевают пройти и прочность вер-

шины зуба не должна уменьшаться.

Выводы

1. Для дисковых пил пакетного резания доминирующее влияние на износ инструмента оказывают тепловые процессы, протекающие в зоне контакта инструмента и обрабатываемого материала.

2. Металлографический анализ зубьев с традиционной формой обнаружил значительный разогрев металла зубьев (температура выше 900 °С), вызывающий собирательную рекристаллизацию и потерю прочности, что облегчает деформацию зубьев.

3. Моделирование процесса нагрева зуба пилы методом конечных элементов подтверждает уменьшение нагрева при изменении геометрии путем введении заднего угла и фаски.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Банников, А.И., Банников, А.А., Курченко, А.И., Дятлов, Н.А., Пермяков, И.Л. Повышение эффективности термофрикционной резки трубопроката // СТИН. – 2010. – № 10. – С. 34-37.

2. Макарова, О.А., Жданов, А.А., Аржуханов, Р.И., Сиукова, Е.О. Определение оптимального заднего угла пилы пакетной резки с использованием моделирования тепловых полей // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2021. – №8 (255). – С. 30-34.

3. Банников, А.И., Макарова, О.А., Аржуханов, Р.И., Сиукова, Е.О. Распределение тепла в зубе пилы с модифицированной геометрией при пакетной резке хо-

лодного металлопроката // Известия ВолгГТУ. Сер. – Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2021. – №8 (255). – С. 9-14.

4. Гуревич, Л.М., Банников, А.И., Новиков, Р.Е., Серов, А.Г. Моделирование высокоскоростного резания в Deform 3D // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 9. – С. 60-64.

5. Банников, А.И. Моделирование формирования заусенца при термофрикционном резании в DEFORM 3D // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 14. – С. 14-17.

REFERENCES

1. Bannikov, A.I., Bannikov, A.A., Kurchenko, A.I., Dyatlov, N.A., Permyakov, I.L. Increasing the efficiency of thermo-friction cutting of rolled pipes / STIN, 2010, No. 10, pp. 34-37.

2. Makarova, O.A., Zhdanov, A.A., Arzhukhanov, R.I., Sivkova, E.O. [Determining the optimal back angle of a batch saw using thermal field modeling] / Izvestiya of Volgograd State Technical University. Ser. Advanced technologies in mechanical engineering, 2021, No.8 (255), pp. 30-34.

3. Bannikov, A.I., Makarova, O.A., Arzhukhanov, R.I., Isakova, E.O. Heat distribution in the tooth of a saw with a modified geometry during batch cutting of cold rolled steel./ Izvestiya of Volgograd State Technical University. Ser. Advanced technologies in mechanical engineering, 2021, No.8 (255), pp. 9-14.

4. Gurevich, L.M., Bannikov, A.I., Novikov, R.E., Serov, A.G. Simulation of high-speed cutting using deform 3D / Izvestiya of Volgograd State Technical University, 2016, No. 9, pp. 60-64.

5. Bannikov, A.I. Simulation of burr formation during thermal friction cutting in DEFORM 3 / Izvestiya of Volgograd State Technical University, 2016, No. 14, pp. 14-17.

Статья поступила в редакцию 24.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 24.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Редактор Д.А. Петраченко. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 17.02.2022. Выход в свет 28.02.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

Научноёмкие технологии в машиностроении, №2 (128) 2022