
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 3(31)

2023

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2023

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2023 г. №3 (31)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

*В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:
2.5.6 Технология машиностроения, 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки, 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы;
2.6.17. Материаловедение (по отраслям)*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

к.т.н., доц. – Рошупкин С.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Редакционная коллегия

*Абдулгизис У.А. д. т. н., проф. (г. Симферополь), Глезер А. М. д. ф-м. н, проф. (г. Москва),
Бохонский А.И. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Дуюн Т.А. д. т. н., доц. (г. Белгород),
Козлов А.М. д. т. н., проф. (г. Липецк),
Копп В.Я. д. т. н., проф. (г. Севастополь), Малышева Г.В. д. т. н., проф. (г. Москва),
Носенко В.А. д. т. н., проф. (г. Волжский), Обжерин Ю.Е. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Новоселов Ю.К. д. т. н., проф. (г. Севастополь),
Суслов А.Г. д. т. н., проф. (г. Москва), Федонин О.Н. д. т. н., проф. (г. Брянск),
Ярошенко А.А. д. т. н., проф. (г. Севастополь)*

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.
Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».
Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 25.12.2023 г.

Тираж: 30 экз.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 106, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;
Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru
Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября,
д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.
Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.
Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Тищенко И.В., Харченко А.О., Часовитина А.С. Систематизация проектных решений с помощью комбинаторного файла для синтеза резьбонарезного станка с механизмом параллельных структур (МПС).....	4
Умеров Э.Д. Статистические исследования стойкости режущего инструмента при сверлении конструкционных сталей.....	8
Мельник Ю.А., Метель А.С., Волосова М.А., Мустафеев Э.С. Удаление износостойкого покрытия с поверхности режущего инструмента пучком быстрых атомов аргона.....	17
Джемилов Э.Ш., Алиев А.И., Палаш И.О., Ресутов Ф.Л. Возможности применения fmea-анализа для исследования качества изделий из полимерных композитных материалов.....	22
Болотников И.Е., Левченко Е.А. Изготовление микрогеометрии режущей кромки концевых фрез с использованием импульсной лазерной абляции.....	28
Скакун В.В., Теминдаров И.Э., Исмаилов Э.Р., Матюхин В.В. Обеспечение размерной точности и качества обработки отверстий развертыванием.....	39
Стадник Т.В., Пахалюк А.В., Харитонов А.В. Влияние алмазного и эльборового шлифования на структурно-напряженное состояние и усталостную прочность стали.....	45

УДК 621.9-114

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОМБИНАТОРНОГО ФАЙЛА ДЛЯ СИНТЕЗА РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО СТАНКА С МЕХАНИЗМОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТРУКТУР (МПС)

*И.В. Тищенко¹,
А.О. Харченко¹,
А.С. Часовитина¹*

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности процесса синтеза нового технологического оборудования является одной из важнейших задач. Таким образом целью данной статьи является описание процесса создания комбинаторного файла для систематизации проектных решений на примере резьбонарезного станка с механизмом параллельных структур (МПС). В статье подчёркивается тот факт, что использование комбинаторного файла позволяет организовать и постоянно дополнять общее множество проектных решений на всех этапах разработки. На основе уже известной систематизации параметров и их исполнений для резьбонарезных станков с МПС был создан комбинаторный файл, который также представлен графически. Делается вывод, что созданный комбинаторный файл может быть использован для дальнейшей оптимизации проектных решений.

Ключевые слова: синтез, резьбонарезной станок, механизм параллельных структур (МПС), комбинаторный файл, проектные решения, систематизация.

DESIGN SOLUTIONS SYSTEMATIZATION USING THE COMBINATORIAL FILE FOR TAPPING MACHINE TOOL WITH PARALLEL STRUCTURE MECHANISM (MPS) SYNTHESIS

*I.V. Tishchenko¹,
A.O. Kharchenko¹,
A. S. Chasovitina¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The improvement of new technological equipment synthesis process is one of the most crucial tasks. Thus the objective of the present paper is the combinatorial file for design solution systematization creation process description illustrated by the example of tapping machine tool with parallel structure mechanism (MPS). It is emphasized that the combinatorial file implementation allows one to organize and constantly expand the general solution set on all development stages. The combinatorial file along with its graphical representation were developed on the basis of existing machine tools with MPS parameters and components systematization. It is concluded that the created combinatorial file can be applied for further design solutions optimization.

Keywords: synthesis, tapping machine tool, parallel structure mechanism (MPS), combinatorial file, design solutions, systematization.

В условиях стремительного развития всех отраслей промышленности и появления новых технологических вызовов особенно остро стоит проблема синтеза нового технологического оборудования. Возросшие потребности ускоренного внедрения новых перспективных образцов требуют решения множества фундаментальных задач, одной из которых является повышение эффективности процесса синтеза оборудования.

При разработке нового изделия конструктор должен постоянно делать выбор между возможными альтернативами для того или иного узла или элемента. С усложнением разрабатываемых технических систем существенно возрастает и число рассматриваемых альтернатив. При этом, некоторые сочетания конструктивных решений часто оказываются неочевидными, а иногда и вовсе скрытыми даже для опытного специалиста.

Решение данной проблемы возможно при использовании системно-морфологического подхода к процессу конструирования, что позволяет не только охватить всё множество решений для конкретного изделия, но и повысить эффективность анализа альтернатив на этапах разработки [1] – [6]. Широко известным является метод морфологической матрицы, который используют для поиска принципиально новых конструкций разрабатываемого объекта путём дробления технических систем на составляющие и всестороннего анализа их альтернатив. Однако, важным по-прежнему остается построение процесса систематизации информации о разрабатываемом изделии.

Повысить эффективность работы с данными об изделии способно использование комбинаторного файла.

Цель исследования: разработать комбинаторный файл резбонарезного станка с механизмом параллельных структур (МПС).

Задачи исследования:

- 1) выделить основные функциональные блоки компоновок резбонарезных станков с МПС;
- 2) разработать комбинаторный файл резбонарезного станка с МПС.

Объект исследования: резбонарезной станок.

Предмет исследования: процесс синтеза рациональных конструкций резбонарезного станка с МПС.

При синтезе любой технической системы, независимо от её сложности, важно уже на начальном этапе систематизировать всё множество возможных решений, а также постоянно дополнять его на всех этапах разработки по мере выявления новых решений [1]. Одним из инструментов, который способен решить данные задачи, является использование комбинаторного файла.

Комбинаторный файл представляет собой всё множество проектных решений в виде структурированного списка из лексикографических записей каждого решения [2]. Уникальность комбинаторного файла состоит в том, что он описывает общее семейство решений, но при этом не описывает какое-то конкретное решение в отдельности. Достоинствами использования комбинаторного файла являются: возможность дополнения на всех этапах разработки и удобство обработки данных об изделии. [1]. Также, подобно морфологической матрице, при исследовании сочетаний различных конструктивных признаков можно обнаружить абсолютно новые, но пока не созданные конструкции разрабатываемого изделия. Важным свойство комбинаторного файла является формирование направленных иерархических цепочек выбора решений, т.е. выбор решения для одного функционального признака сужает круг альтернатив для другого, или вовсе их исключает.

Для построения комбинаторного файла вначале определяются функциональные составляющие будущего изделия, а также формулируются варианты решений для каждой составляющей. После чего составляющие параметры с их исполнениями структурируются в виде списка. В комбинаторный файл также при необходимости могут включаться данные о

технологии изготовления, сведения о взаимодействии проектируемого объекта с окружающей средой и многое другое.

Подробная, основанная на морфологическом анализе, систематизация параметров и их исполнений для компоновок резьбонарезных станков с МПС, приводится в работах [7] – [10]. Основными параметрами являются: расположение исполнительного органа станка, вид инструментального модуля, конструкция стола, расположение неподвижного основания, количество степеней свободы, метод преобразования движения, тип привода МПС, тип линейных звеньев, наличие и расположение направляющих.

На основе выделенных параметров и их исполнений составляется комбинаторный файл резьбонарезного станка с МПС, который охватывает все возможные варианты реализации проектного решения.

Ниже представлен комбинаторный файл резьбонарезного станка с МПС.

1. Расположение исполнительного органа станка.
 - 1.1. На подвижном элементе.
 - 1.2. На неподвижном элементе.
2. Вид инструментального модуля.
 - 2.1. Однопозиционный.
 - 2.2. Многопозиционный.
3. Конструкция стола.
 - 3.1. Стол отсутствует.
 - 3.2. Неподвижный стол.
 - 3.3. Подвижный стол
4. Расположение неподвижного основания.
 - 4.1. Основание установлено на полу.
 - 4.2. Основание подвешено.
5. Количество степеней свободы.
 - 5.1. Две.
 - 5.2. Три.
 - 5.3. Четыре.
 - 5.4. Пять.
 - 5.5. Шесть.
6. Метод преобразования движения.
 - 6.1. Изменение координат опорных шарниров.
 - 6.2. Изменение длины штанг.
 - 6.3. Вращение шарнира на неподвижном основании.
 - 6.4. Изменение угла между элементами кинематической цепи.
 - 6.5. Комбинированный метод.
7. Тип привода МПС.
 - 7.1. Пневматический.
 - 7.2. Гидравлический.
 - 7.3. Электромеханический
8. Тип линейных звеньев.
 - 8.1. Звено постоянной длины.
 - 8.2. Звено переменной длины.
9. Наличие и расположение направляющих.
 - 9.1. Направляющие отсутствуют.

- 9.2. Прямой формы с параллельным расположением.
- 9.3. Прямой формы с непараллельным расположением.
- 9.4. Треугольной формы.
- 9.5. Круглой формы.
- 9.6. Звездообразной формы.

Графическое представление резьбонарезного станка с МПС в виде дерева блоков представлено на рис. 1.

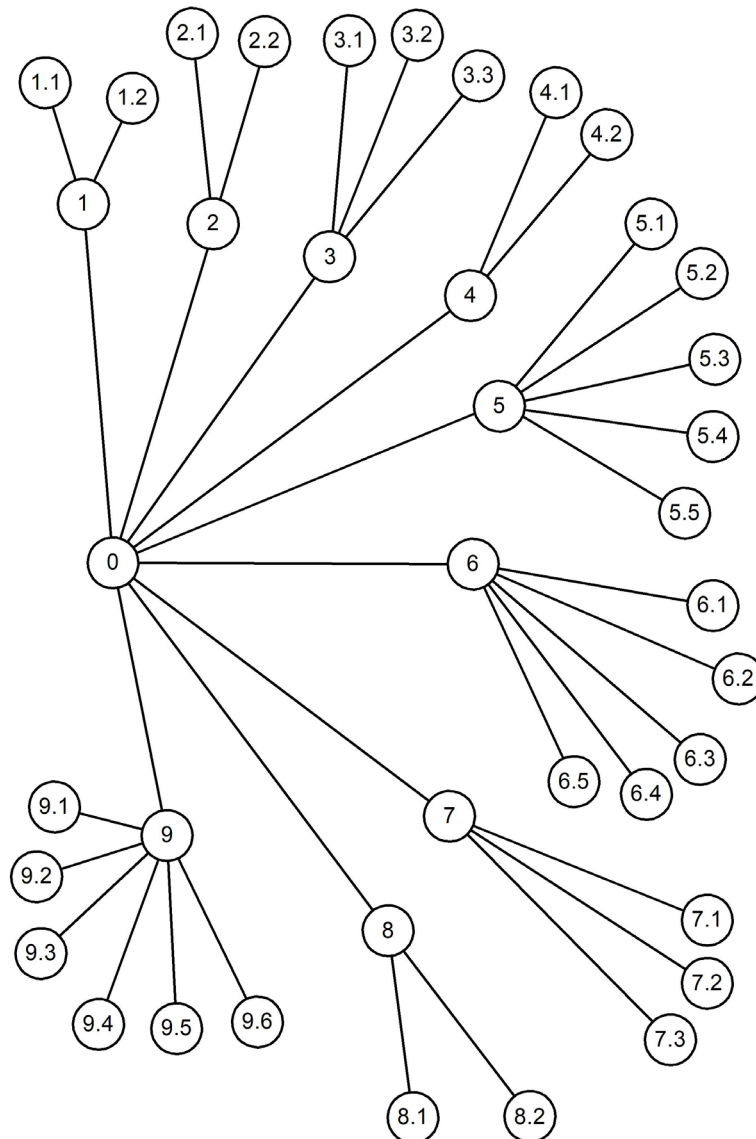


Рисунок 1. Дерево блоков резьбонарезного станка с МПС

Таким образом, созданный комбинаторный файл позволяет систематизировать проектные решения при разработке резьбонарезного станка с МПС, а также всесторонне учитывать проектные критерии. Также путём использования специальных методов возможна оптимизация поиска компоновок станка и переход к структурно-компоновочному синтезу.

Список литературы

1. Харченко, А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: метод. указания / Сост. А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рощупкин. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 121 с.
2. Капустян В.М.. Конструктору о конструировании / В.М. Капустян. – Москва: Коцепт, 2008. – 312 с.
3. Freddi A. Design Principles and Methodologies: From Conceptualization to First Prototyping with Examples and Case Studies / A. Freddi, M. Salmon. – Springer, 2019. – 284 с.
4. Qiu, C. Design Theory and Method of Complex Products: A Review / C.Qiu, J. Tan, Z. Liu // Chin. J. Mech. Eng. – 2022. – Vol. 35. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00779-0> (дата обращения 23.11.2023).
5. Степанов Ю.С. Эвристические методы в инженерном деле: учебное пособие для высшего профессионального образования / Ю.С. Степанов, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2014. – 181 с.
6. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дитрих. – Москва: Мир, 1981. – 454 с.
7. Братан С.М. Разработка компоновки резьбонарезного станка на основе инструментальной головки револьверного типа и механизма параллельных структур (МПС) с помощью морфологического анализа / С.М. Братан, И.В. Тищенко, А.О. Харченко, А.С. Часовитина // Вестник современных технологий. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2022. – №4 (28). – С. 19-27.
8. Харченко А.О. Разработка компоновки резьбонарезного станка с комбинированным механизмом параллельных структур (МПС) / А.О. Харченко, И.В. Тищенко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2022. – № 4 (78). – С. 283-290.
9. Merlett, J.P. Parallel Robots / J.P. Merlett. – Dodrecht: Springer, 2006. – 394 с.
10. Кузнецов, Ю.Н. Компоновка станков с механизмами параллельной структуры: Монография / Ю.Н. Кузнецов, Д.А. Дмитриев, Г.Е. Диневич. – Херсон: ЧП Вышемирский. – 2010. – 471 с.

УДК 621.9

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ СВЕРЛЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Э.Д. Умеров¹

¹ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова», Симферополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты статистических исследований распределение периода стойкости сверл из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 45 при подаче масляных СОТС. Показано, что не зависимо от состава подаваемой СОТС, распределение стойкости

подчиняется закону нормального распределения случайных величин. Также приведены результаты экспериментальных исследований эффективности масляных СОТС с НГМП при сверлении конструкционных материалов, обладающей улучшенными триботехническими свойствами, позволяющая увеличить стойкость режущего инструмента.

Ключевые слова: масляные СОТС, процесс сверления, математическое моделирование, режущий инструмент, математическая модель.

STATISTICAL STUDIES OF THE DURABILITY OF CUTTING TOOLS WHEN DRILLING STRUCTURAL STEELS

E.D. Umerov¹

¹ *Crimean engineering and pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russian Federation*

ABSTRACT

The article presents the results of statistical studies of the distribution of the durability period of drills made of high-speed steel P6M5 during the processing of steel 45 with the supply of oil lubricating and cooling process medium. It is shown that, regardless of the composition of the supplied lubricating and cooling process medium, the stability distribution obeys the law of normal distribution of random variables. The results of experimental studies of the effectiveness of oil lubricating and cooling process medium with an additive of nanoglinous mineral when drilling structural materials, which has improved tribotechnical properties, allowing to increase the durability of the cutting tool, are also presented.

Keywords: oil lubricating and cooling technological means, drilling process, mathematical modeling, cutting tool, mathematical model.

Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали достигается в основном снижением температуры и улучшением триботехнической обстановки в зоне резания под действием смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) [1]. Несмотря на ряд технологических решений по составу и применению последних, стойкость режущего инструмента, в особенности сверл продолжает оставаться достаточно низкой. В работах [2, 3] показана возможность формирования эндотермических и улучшения триботехнических свойств масляных СОТС с наноглинистыми минеральными присадками (НГМП).

Под наблюдение было взято группа одинаковых сверл 50 штук из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 10 мм, с углом заточки $2\varphi = 118^\circ$.

Режимы резания при сверлении заготовки из стали 45 частота вращения $n = 500$ об/мин, подача $s = 0,18$ мм/об.

Для обработки результатов стойкостных экспериментов воспользуемся законами распределения случайных величин. Анализ случайных величин, как изучаемых теоретически, так и вычисляемых на основе экспериментов показывает, что наиболее часто их распределение подчиняется нормальному закону [4, 5]. Исходя из этого полагаем, что распределение периода стойкости сверл, взятых под наблюдение, до критического износа, в зависимости от состава подаваемой СОТС также является нормальным.

Статистические данные периода стойкости (наработки) режущего инструмента до критического износа, сведены в таблицу 1, обработаны методом сумм и произведений с расчетом начальных, центральных и основных моментов.

Цель статьи – провести статистические исследования стойкости режущего инструмента при сверлении конструкционных материалов при подаче масляных СОТС.

Таблица 1. Период стойкости сверл до критического износа, при подаче традиционной масляной СОТС (И-20), мин.

1	2	3	4	5
30,1	29,0	16,9	29,4	28,6
26,1	19,8	23,1	24,6	30,2
28,0	14,7	21,0	23,9	31,0
25,7	20,2	30,6	22,0	29,6
14,7	18,5	17,3	28,8	28,9
13,2	24,9	29,4	34,5	30,4
26,1	29,0	28,1	30,8	30,9
29,3	18,1	30,1	26,9	30,1
17,8	22,4	32,9	25,7	27,6
21,0	25,2	28,0	26,1	27,9

По данным таблицы 1, составлена рабочая таблица распределения периода стойкости режущего инструмента до критического износа (табл. 2). Далее приведены результаты расчетов на примере подачи традиционной СОТС. В первом столбце табл. 2, вписывались принятые интервалы (разряды), величина которых определялась по формуле:

$$C_u = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{K} = \frac{34,5 - 13,2}{7} = 3,05 \quad (1)$$

где $X_{\max}$ – максимальное значение параметра по результатам исследований;

$X_{\min}$ – минимальное значение параметра по результатам исследований;

K – количество разрядов;

Таблица 2. Распределения периода стойкости режущего инструмента до критического износа.

Интервалы периода стойкости сверл до критического износа	Среднее значение интервала	Частота	% (частость)
13,2-16,25	14,73	3	6
16,25-19,3	17,8	5	10
19,3-22,35	20,8	5	10
22,35-25,4	23,9	6	12
25,4-28,45	26,9	11	22
28,45-31,5	30	18	36
31,5-34,55	33	2	4

Во втором столбце записывались средние значения, а затем методом последовательного просмотра статистических данных производилась отметка (сводка) количества величин, попавших в соответствующий разряд (столбец 3). Сумма частот всех разрядов представляет объем частичной совокупности (количество сверл, снятых на переточку – 50 штук). В табл. 2 содержатся исходные данные вычисления основных характеристик ряда распределения снятия сверл для переточки. Вычисление начальных моментов производилось по схеме табл. 3, которая состоит из шести столбцов. Столбцы один и два выписывались из табл. 2. Против частоты, соответствующей начальному значению $X_{(a)} = 23,9$ мин, проводилась черта, разбивающая таблицу на две части- верхнюю и нижнюю, в каждой из которых суммирование производилось отдельно. Число столбцов определялась по следующему правилу: для образования каждого числа складывалось число, стоящее непосредственно над образующим (в верхней части таблицы) или под образующим (в нижней части таблицы). Суммирование

производилось по направлению от конца столбца 2 к середине и заканчивалась в каждом столбце на один разряд раньше, чем в предыдущем. Внизу таблицы указаны суммы чисел верхней отрицательной строки и нижней положительной. В строке S подсчитывались суммы строк 8 и 9 без учета знака, а в последней – d суммы чисел этих же строк с учетом знака.

Таблица 3. Промежуточные решения.

№ п/п	Среднее значение интервала	Частота	(1)	(2)	(3)	(4)
	1	2	3	4	5	6
1	14,73	3	3	3	3	–
2	17,8	5	8	11	–	–
3	20,8	5	13	–	–	–
4	23,9	6				
5	26,9	11	32	–	–	
6	30	18	20	22	–	
7	33	2	2	2	2	
			24	14	3	8-ая строка
			53	24	2	9-ая строка
			77	38	5	S
			+29	+10	–1	d

Начальные моменты определялись по следующим формулам:

$$m_1 = \frac{d}{n} = \frac{29}{50} = 0,58; \quad (2)$$

$$m_2 = \frac{S_1 + 2S_2}{n} = \frac{77 + 2 \cdot 38}{50} = 3,06; \quad (3)$$

$$m_3 = \frac{d_1 + 6d_2 + 6d_3}{n} = \frac{29 + 6 \cdot 10 + 6(-2)}{50} = 1,54; \quad (4)$$

$$m_4 = \frac{S_1 + 14S_2 + 36S_3 + 24S_4}{n} = \frac{77 + 14 \cdot 38 + 36 \cdot 5 + 24 \cdot 0}{50} = 15,78; \quad (5)$$

где d_1, d_2, d_3, d_4 – разности сумм верхней и нижней части столбцов, соответственно 1,2,3,4;

S_1, S_2, S_3, S_4 – суммы сумм верхней и нижней частей столбцов соответственно: (1), (2), (3), (4).

При помощи начального момента определялось среднее значение периода стойкости сверла.

Центральные моменты связанные с начальными следующими зависимостями:

$$\mu_0 = 1; \quad \mu_1 = 0; \quad (6; 7)$$

$$\mu_2 = m_2 - m_1^2 = 3,06 - 0,58^2 = 2,72; \quad (8)$$

$$\mu_3 = m_3 - 3m_2 \cdot m_1 + 2m_1^3 = 1,54 - 3 \cdot 3,06 \cdot 0,58 + 2 \cdot 0,58^3 = -4,17; \quad (9)$$

$$\mu_4 = m_4 - 4m_3 \cdot m_1 + 6m_2 \cdot m_1^2 - 3m_1^4 = 15,78 - 4 \cdot 1,54 \cdot 0,58 + 6 \cdot 3,06 \cdot 0,58^2 - 3 \cdot 0,58^4 = 18,04. \quad (10)$$

Среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\mu_2} = \sqrt{2,72} = 1,65. \quad (11)$$

Среднеквадратичное отклонение в единицах переменной величины рассчитывалось по формуле

$$\bar{\sigma} = Cu \cdot \sigma = 3,05 \cdot 1,65 = 5,03. \quad (12)$$

При помощи центральных моментов 3-го и 4-го порядков определялись основные моменты 3-го и 4-го порядка

$$r_3 = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{-4,17}{1,65^3} = -0,93; \quad (13)$$

$$r_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^3} = \frac{18,04}{1,65^3} = 4,0. \quad (14)$$

Третий основной момент служит мерой асимметрии т.е. $S_\kappa = r_3 = -0,93$, а четвертый основной момент – мерой крутости (эксцесс):

$$E_\kappa = r_4 - 3 = 4,0 - 3 = 1. \quad (15)$$

Расчет основных характеристик ряда случайной величины производился нами по ограниченному количеству данных ($n = 50$), значит, полученные характеристики частичны совокупности требуют оценки, позволяющей судить, с какой надежностью сделаны выводы. Оценка основных характеристик ряда распределения случайной величины производилась при помощи специальных ошибок, которые выражаются следующими зависимостями:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad \delta_\delta = \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}; \quad (16; 17)$$

$$\sigma_{S_\kappa} = \sqrt{\frac{\sigma}{n}}; \quad \sigma_{E_\kappa} = 2\sigma_{S_\kappa}; \quad (18; 19)$$

где $\sigma_{\bar{x}}$ – ошибка среднего значения;

σ_σ – ошибка среднеквадратичного отклонения;

σ_{S_κ} – ошибка асимметрии;

σ_{E_κ} – ошибка эксцесса.

Оценка точности проведенного исследования проводилась по уравнению

$$\rho = \frac{V}{\sqrt{n}} = \frac{20,3}{\sqrt{50}} = 2,87\% \quad (20)$$

где V – мера изменчивости ряда распределения выхода сверла на переточку

$$v = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{x}} = \frac{5,03}{24,8} = 20,3\% \quad (21)$$

Близость характеристик асимметрии и эксцесса к нулю свидетельствует о том, что распределение периода стойкости до первой переточки близко к нормальному распределению.

Плотность нормального распределения выражается формулой

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (22)$$

Для построения нормального распределения необходимо определить выровненные частоты согласно таблицы 4.

Величину $f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$ находим по данным работ [4-6] и заносим в колонку 4 таблицы 5.7.

$$\frac{n \cdot C_u}{\sigma} = \frac{50 \cdot 3,05}{5,03} = 30,31; \quad (23)$$

где C_u – величина интервала ($C_u = 3,05$ мин).

Таблица 4. Промежуточные решения.

Среднее значение интервала	Частота (количество сверл)	$t = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$	$f(t)$	Теоретические частоты	Теоретические округленные частоты	%
1	2	3	4	5	6	7
14,73	3	2,01	0,0529	1,6	2	4
17,8	5	1,4	0,1497	4,53	5	10
20,8	5	0,8	0,2897	8,78	9	18
23,9	6	0,19	0,3918	11,87	12	24
26,9	11	0,41	0,3668	11,11	11	22
30	18	1,01	0,2396	7,26	8	16
33	2	1,62	0,1074	3,25	3	6
	50				50	100

Произведение полученного множителя на величину $f(t)$ для каждого интервала (колонка 5). По данным таблицы 4 строим полигон распределения (по фактическим частотам) и кривую нормального распределения по выровненным теоретическим частотам (табл. 5, рис. 1), зная теоретическую кривую распределения, производим её оценку по отношению к эмпирическим (фактическим) линиям с помощью критерия согласия

$$\chi^2 = \sum \frac{(n - n_i^o)^2}{n_i^o}, \quad (24)$$

где n – фактическая частота i -го интервала;

n_i – теоретическая частота i -го интервала;

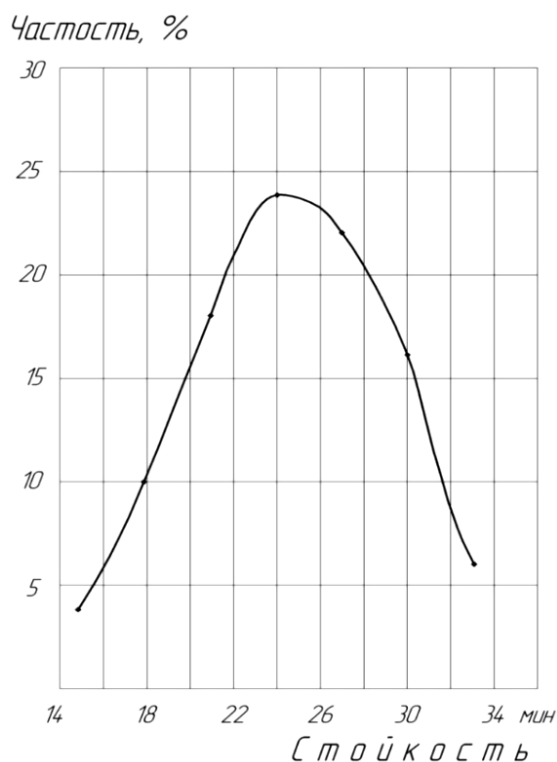


Рисунок 1. Распределение периодов стойкости сверл при подаче традиционной масляной СОТС (И-20).

Расчет определения вероятности «Р» для $\chi^2 = 22,97$ необходимо рассчитать число степеней

свободы. Для нормального распределения числа свободы определяется по формуле

$$K_c = K - 3 = 7 - 3 = 4, \quad (25)$$

где K – число разрядов интервалов.

Вероятность существования $\chi^2 = 22,97$ равна 0,0796. Полученная вероятность значительно больше 0,01. Следовательно, имеющиеся расхождения между теоретическими и фактическими частотами случайны, а предположение о том, что случайная величина моментов снятия сверл для переточки распределена по нормальному закону, хорошо согласуется с фактическими данными.

Таблица 5. Промежуточные вычисления, используемые в критерии.

Фактическая частота n_i	Теоретическая частота n_i°	Разность $n_i - n_i^\circ$	$(n_i - n_i^\circ)^2$	$\frac{(n_i - n_i^\circ)^2}{n_i^\circ}$
3	2	1	1	0,5
5	5	0	0	0
5	9	-4	16	1,78
6	12	-6	36	3
11	12	-1	1	0,08
18	7	11	121	17,28
2	3	-1	1	0,33
Итого	-	-	-	22,97

По результатам настоящих статистических исследований вытекает, что распределение периода стойкости сверл из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 45 с подачей и традиционной СОТС подчиняются нормальному закону. Видно также, что средние значения периода стойкости сверл составляет 23,9 минут.

Естественно, практическое значение имеет сопоставление фактического периода стойкости сверла до первой переточки с заданным ресурсом для этого сверла.

Сведенные данные таблицы 6, также обработаны методом сумм и произведений с расчетом начальных, центральных и основных моментов. Для обработки результатов стойкостных экспериментов воспользовались законами распределения случайных величин.

Аналогичным образом был произведен расчет и для сверл, при подаче экспериментальной масляной СОТС (подсолнечное масло+НГМП), результаты которых сведены в таблицу 7 и построены кривые нормального распределения (рисунок 2).

Таблица 6. Период стойкости сверл до критического износа, при подаче экспериментальной масляной СОТС (подсолнечное масло+НГМП), мин.

1	2	3	4	5
34,2	42,5	39,5	41,6	40,3
40,5	36,8	44,1	38,7	43,5
43,8	43,4	41,2	42,8	36,5
38,9	41,7	44,5	41,7	44,9
43,6	45,6	35,4	43,3	42,8
45,7	41,3	46,9	41,3	38,5
37,3	39,2	41,8	43,5	42,1
47,5	41,9	41,3	37,9	45,9
43,9	44,9	47,9	46,1	43,9
40,8	42,9	40,1	42,7	39,8

Таблица 7. Промежуточные решения

Среднее значение интервала	Частота (количество сверл)	$t = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$	$f(t)$	Теоретические частоты	Теоретические округленные частоты	%
1	2	3	4	5	6	7
35,2	2	2,43	0,0203	0,641277	1	2
37,2	4	1,8	0,079	2,49561	3	6
39,2	7	1,16	0,2036	6,431724	7	14
41,2	15	0,09	0,3973	12,55071	13	26
43,2	12	0,53	0,3467	10,95225	11	22
45,2	7	0,72	0,3078	9,723402	10	20
47,2	3	1,35	0,1604	5,067036	5	10
	50				50	100

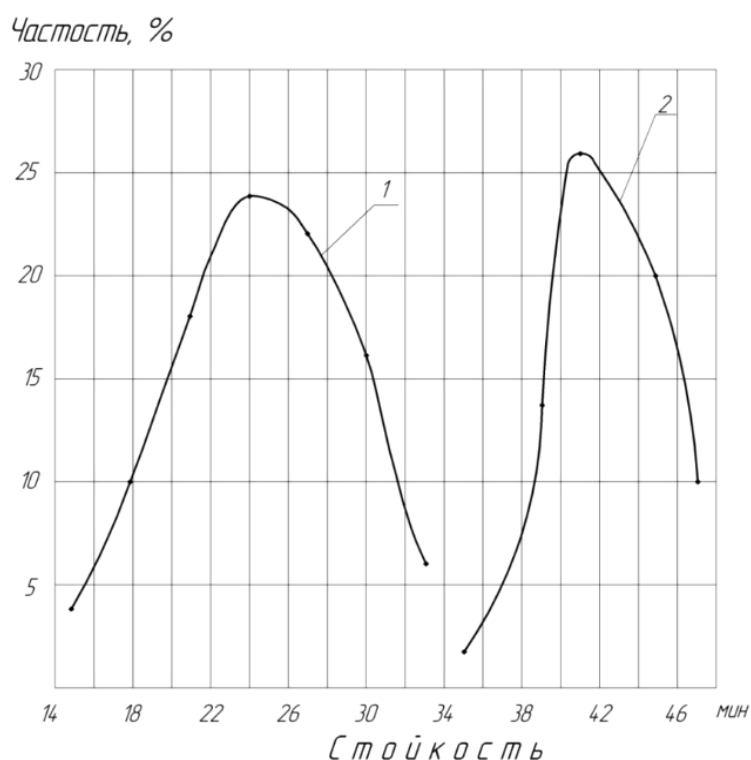


Рисунок 2. Распределение периодов стойкости сверл при подаче:

- 1 – традиционной масляной СОТС (И-20);
2 – экспериментальной СОТС с НГМП

Выводы.

Таким образом, из результатов настоящих статистических исследований вытекает, что распределение периода стойкости сверл из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 45 с подачей и традиционной и экспериментальной СОТС подчиняются нормальному закону. Видно также, что средние значения периода стойкости сверл составляют соответственно 23,9 и 41,2 минут.

Естественно, практическое значение имеет сопоставление фактического периода стойкости сверла до первой перезаточки с заданным ресурсом для этого сверла.

Список литературы

1. Виноградов Д.В. Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов: учебное пособие по курсу «Инструментообеспечение машиностроительных предприятий» / Д.В. Виноградов. – Ч.1: Функциональные действия. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 90 с.
2. Абдулгасис Д.У. О возможности формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС присадкой наноглинистых минералов листовой структуры / Д.У. Абдулгасис, Э.Д. Умеров // Известия Волгоградского технического университета. Серия: «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. №5(184). 2016. – С. 7-11.
3. Умеров Э.Д. Влияние на коэффициент трения присадки к масляной субстанции СОТС в виде наноглинистого минерала / Э.Д. Умеров, Ш.Т. Мевлют, Д.У. Абдулгасис, У.А. Абдулгасис // Вестник современных технологий. Издательство: ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет" (Севастополь). – №2(18), – 2020 . С.4-9.
4. Венецкий И.Г. Вариационные и их характеристики. / И.Г. Венецкий – М.: Статистика, 1970. – 160 с.
5. Карасев И.И. Теория вероятности и математическая статистика // И.И. Карасев – М.: Статистика, 1979. – 210 с.
6. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений: монография. М.: Наука, 1968. – 288 с. : ил. – (Физико-математическая б-ка инженера). – Библиогр.: с.268.

УДК 537.525

УДАЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ С ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ АРГОНА

**Ю.А. Мельник¹,
А.С. Метель¹,
М.А. Волосова¹,
Э.С. Мустафаев¹**

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Износостойкие покрытия улучшают характеристики режущих инструментов и продлевают срок их службы. Однако, когда инструмент необходимо использовать повторно, необходимо удалить существующее покрытие, чтобы облегчить его повторную заточку и повторное осаждение покрытия. Используемое для этого электрохимическое удаление опасно для окружающей среды. Удаление покрытий импульсным лазером является экологически чистым процессом. Однако он вызывает плавление и смешивание материалов инструмента и покрытия, что затрудняет отделение и удаление последнего. В данной работе представлены результаты удаления покрытия пучком быстрых атомов аргона. Благодаря двадцатикратной

компрессии пучка покрытие AlTiN толщиной 3 мкм удаляется с вращающейся твердосплавной концевой фрезы за 25 мин. Последующая обработка очищенного инструмента тем же пучком в течение часа приводит к уменьшению радиуса режущих кромок инструмента от 10,5 до 3,5 мкм. Это позволяет нанести новое покрытие AlTiN толщиной 3,5 мкм и получить износостойкую концевую фрезу с радиусом режущей кромки 7 мкм, меньшим исходной величины.

Ключевые слова: режущие инструменты; удаление износостойких покрытий; быстрые атомы аргона; компрессия пучка; заточка режущих кромок; осаждение покрытий.

REMOVAL OF WEAR-RESISTANT COATINGS FROM THE SURFACE OF CUTTING TOOLS BY A BEAM OF FAST ARGON ATOMS

*A.S. Metel¹,
Y.A. Melnik¹,
M.A. Volosova¹,
E.S. Mustafaev¹*

¹ *Moscow State University of Technology “STANKIN”, Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Wear-resistant coatings improve cutting tool performance and extend tool life. However, when the tool is to be re-used, the existing coating must be removed to facilitate resharpener and recoating. The electrochemical removal used for this is hazardous to the environment. The removal of coatings with a pulsed laser is an environmentally friendly process. However, it causes melting and mixing of tool and coating materials, which makes it difficult to separate and remove the latter. In this paper, we present the results of removing the coating by a beam of fast argon atoms. Due to twenty-fold beam compression, a 3 μm thick AlTiN coating is removed from a rotating carbide end mill in 25 minutes. Subsequent processing of the cleaned tool with the same beam for an hour leads to a decrease in the radius of the cutting edges of the tool from 10.5 to 3.5 μm . This makes it possible to deposit an AlTiN coating with a thickness of 3.5 μm and obtain a wear-resistant end mill with a cutting edge radius of 7 μm , which is smaller than the original value.

Keywords: cutting tools; stripping of wear-resistant coatings; fast argon atoms; beam compression; sharpening of cutting edges; coating deposition.

Введение

Износостойкие покрытия существенно увеличивают срок службы металлорежущих инструментов. Однако, когда покрытие изнашивается, его следует удалить, чтобы облегчить повторную заточку и повторное покрытие. Удаление износостойких покрытий является сложной задачей из-за их сильной адгезии и малой толщины [1].

Одним из широко применяемых методов удаления покрытий является химический метод, основанный на применении различных растворов кислот [2,3]. Инструмент помещают в кислоту для растворения изношенного или дефектного покрытия. Утилизация использованных растворов является одной из основных проблем этого метода.

Для быстрого и качественного удаления покрытий можно использовать лазерный луч [4,5]. В [6] с помощью энергодисперсионной спектроскопии на зачищенных поверхностях обнаружено примерно 20–30 % элементов покрытия. Причина в том, что при импульсном

лазерном удалении происходит плавление и смешивание материалов инструмента и покрытия, что замедляет процесс обработки. Кроме того, лазерное удаление покрытий демонстрирует достаточно неровную поверхность обработанных образцов. Одной из причин является малое значение диаметра лазерного пятна $\sim 0,1$ мм. В результате плавления и испарения в последующих точках образца с покрытием образуется волнистая поверхность с длиной волны, сравнимой с диаметром лазерного пятна. Чтобы этого избежать, необходимо воздействовать на поверхность широким пучком равномерно распределенных частиц. Частицы могут быть ускоренными ионами или быстрыми нейтральными атомами.

Существует множество источников ионов, дающих пучки с круглым сечением [7]. Диаметр луча может составлять 38 см [8] и даже достигать 50 см [9]. Плазменный эмиттер ионов формируется в газоразрядной камере с термоэмиссионными катодами. Ионы ускоряются ионно-оптической системой, из двух или трех параллельных сеток. Ток ионного пучка может достигать нескольких ампер при энергии ионов до нескольких кэВ.

Источники с термоэмиссионными катодами не могут образовывать ионы химически активных газов. Поэтому были разработаны источники ионов с плазменными эмиттерами, генерируемыми в газовом разряде с холодным полым катодом [10,11]. Поскольку положительные ионы способны заряжать поверхность любых обрабатываемых подложек, вместо источников ионов целесообразно использовать источники быстрых нейтральных атомов [12-14].

Скорость распыления является важнейшим параметром, определяющим применимость быстрых атомов для удаления покрытий. С практической точки зрения время обработки не должно превышать время ~ 10 – 20 мин, необходимое для вакуумирования рабочей камеры после загрузки в нее инструмента. Поэтому для удаления покрытия AlTiN толщиной 3 мкм в течение 20 мин скорость травления должна составлять около 10 мкм/ч. В настоящей работе доказана достижимость этих параметров в результате компрессии пучка быстрых атомов аргона.

Материалы и методика

В качестве образцов для проведения экспериментов были выбраны цельные твердосплавные винтовые концевые фрезы с цилиндрическими хвостовиками. Длина концевой фрезы равна 100 мм, диаметры ее режущей части и хвостовика – 10 мм, длина режущей части – 40 мм, а длина хвостовика – 44 мм. На режущей части концевой фрезы нанесено покрытие AlTiN толщиной 3 мкм.

На рис. 1 представлена экспериментальная установка для удаления износостойких покрытий. Она состоит из цилиндрической вакуумной камеры диаметром 50 см и длиной 30 см и прямоугольного корпуса, которые сообщаются друг с другом через прямоугольное отверстие в стенке камеры. Длина корпуса составляет 50 см, его ширина и высота равны 40 см и 30 см соответственно. Внутри камеры установлен анод, подключенный к положительному полюсу источника питания разряда.

Между камерой и корпусом установлена ускоряющая сетка шириной 31 см и высотой 21 см, выполненная в виде части полого цилиндра диаметром 80 см (рис. 2). Сетка изготовлена из титанового листа толщиной 1 мм с отверстиями диаметром 7,2 мм на расстоянии 8 мм между их центрами. Через высоковольтный ввод сетка подключена к источнику ускоряющего напряжения до 6 кВ.

Внутри корпуса на расстоянии 40 см от ускоряющей сетки расположен вращающийся со скоростью 60 об/мин держатель инструмента, очищаемого от износостойкого покрытия. Рядом с держателем на обеих боковых стенках корпуса установлены два планарных магнетрона.

Ширина мишеней магнетрона равна 100 мм, а их длина 200 мм. Одна из мишеней изготовлена из титана, а другая – из алюминия. Мишени магнетрона удалены от вращающегося держателя на 100 мм и снабжены подвижными заслонками, предохраняющими их от осаждения материала удаляемого покрытия.

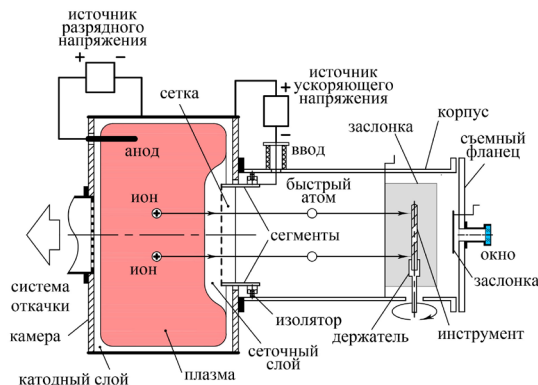


Рисунок 1. Схема установки для удаления покрытий

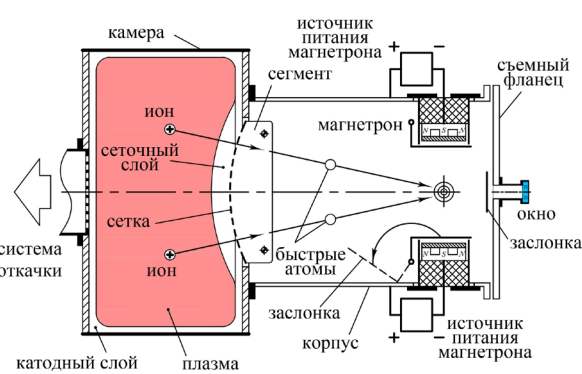


Рисунок 2. Схема установки (вид сверху)

При давлении газа 0,2 Па включение источника питания разряда приводит к зажиганию газового разряда и заполнению камеры и корпуса разрядной плазмой. После включения источника ускоряющего напряжения увеличение напряжения U между камерой и сеткой приводит сначала к росту тока в цепи сетки I_c , а затем к резкому падению тока (рис. 3), сопровождающемуся погасанием свечения плазмы в корпусе.

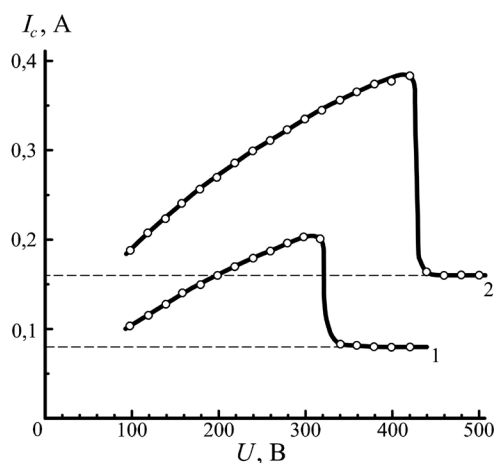


Рисунок 3. Зависимость тока в цепи сетки I_c от напряжения U на сетке при токе разряда $I_p = 1$ А (1) и 2 А (2)

При большем напряжении U сетка препятствует проникновению электронов из камеры в корпус, корпус больше не участвует в разряде, а ток в цепи сетки I_c сохраняет постоянное значение.

Оценки скорости распыления покрытия TiAlN пролетающими через сетку ускоренными частицами с энергией 6 кэВ при токе разряда в камере 2 А дают $v \sim 1$ мкм/ч. Следовательно, быстрые атомы аргона не могут обеспечить требуемую скорость съема покрытия, превышающую 10 мкм/ч.

Скорость удаления износостойкого покрытия была увеличена за счет компрессии пучка быстрых атомов аргона, формируемого вогнутой ускоряющей сеткой (рис. 2). После того, как ускоренные из плазмы ионы пересекли сетку с радиусом кривизны поверхности 40 см, они движутся к фокальной линии цилиндрической сетки, удаленной на 40 см. При начальной ширине пучка 30 см ее уменьшение до 1,5 см привело к двадцатикратному увеличению интенсивности травления.

При травлении концевой фрезы длиной 100 мм и диаметром 10 мм с покрытием AlTiN толщиной 3 мкм на вращающемся держателе (рис. 1) наблюдение через окно позволило определять момент удаления покрытия по изменению цвета поверхности инструмента. При давлении аргона $p = 0,2$ Па, токе разряда $I_p = 2$ А и напряжении на сетке $U = 6$ кВ покрытие сначала исчезало в пазах концевой фрезы, а для удаления покрытия AlTiN со всей ее поверхности потребовалось 25 мин.

Перед травлением концевой фрезы с помощью измерительной системы MicroCAD premium+ измеряли радиусы ее режущих кромок.

Радиус режущей кромки измеряли в трех зонах А, В и С, удаленных на 5, 20 и 35 мм от конца фрезы. Среднее значение радиуса режущей кромки в зоне А, удаленной от торца фрезы на 5 мм, было равно $R_A = 13,8$ мкм; радиус режущей кромки в зоне В, удаленной от торца фрезы на 20 мм, был равен $R_B = 14,2$ мкм; радиус режущей кромки в зоне С был равен $R_C = 13,6$ мкм.

После травления концевой фрезы в течение 25 мин цвет ее режущей части изменился и стал неотличим от цвета хвостовика. Элементный анализ протравленной поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA3 LMN (Tescan, Брно, Чехия) не выявил следов алюминия и титана. Это означает, что покрытие AlTiN было полностью удалено. Измерение радиуса режущей кромки показало, что в зоне А, удаленной от протравленного конца фрезы на 5 мм, он был равен $R_A = 10,6$ мкм; в зоне В, удаленной от травленного конца фрезы на 20 мм, радиус режущей кромки был равен $R_B = 10,9$ мкм, а в зоне С, удаленной на 35 мм, он был равен $R_C = 10,4$ мкм. Температура концевой фрезы, измеренная при снятии покрытия, не превышала 700°C.

Затем концевую фрезу уже без износостойкого покрытия снова установили на вращающийся держатель и травили быстрыми атомами аргона в течение часа при тех же параметрах. Для оценки скорости травления на хвостовике фрезы была надета маска. После травления маску удалили и с помощью профилометра HOMMEL TESTER T8000 измерили высоту ступеньки между участками профилограммы хвостовика, соответствующими закрытой маской и открытой поверхности хвостовика. Разделив высоту ступеньки 7,6 мкм на время травления, мы получим скорость травления 7,6 мкм/ч. После травления радиус режущей кромки в зоне А, удаленной от протравленного торца фрезы на 5 мм, был равен $R_A = 3,6$ мкм; в зоне В, удаленной от протравленного конца фрезы на 20 мм, радиус режущей кромки был равен $R_B = 3,5$ мкм, а в зоне С, удаленной на 35 мм, он был равен $R_C = 3,4$ мкм.

Концевую фрезу с заточенными режущими кромками и прикрепленной к хвостовику маской снова установили на вращающийся держатель для нанесения нового износостойкого покрытия. Перед напылением инструмент нагрели и активировали его поверхность в течение 5 мин быстрыми атомами аргона при давлении газа $p = 0,2$ Па, токе разряда $I_p = 2$ А и напряжении на сетке $U = 6$ кВ. Затем к аргону добавили 30 % азота, ток разряда уменьшили до 0,5 А, а напряжение на сетке — до 1 кВ. После открытия заслонок как алюминиевой, так и титановой мишеней магнетронов были включены источники питания магнетронов со стабилизированными токами по 6 А. В течение двухчасового процесса осаждения покрытие бомбардировали быстрыми атомами аргона и азота [15]. Температура концевой фрезы, измеренная пирометром IMPAC IP 140 во время нанесения нового покрытия, составила 420°C.

Среднее значение радиуса режущей кромки в зоне А на расстоянии 5 мм от торца фрезы с новым покрытием составило $R_A = 7,2$ мкм; в зоне В, удаленной от конца фрезы на 20 мм, радиус режущей кромки был равен $R_B = 7,1$ мкм, а в зоне С, удаленной на 35 мм, он был равен $R_C = 7,0$ мкм.

Таким образом, вогнутая сетка под отрицательным напряжением более 1 кВ способна формировать концентрированные пучки быстрых атомов в корпусе, примыкающем к камере, заполненной плазменным эмиттером ионов. В нашем случае двадцатикратная компрессия пучка быстрых атомов аргона шириной 30 см с энергией 6 кэВ позволила удалить покрытие AlTiN толщиной 3 мкм с твердосплавной концевой фрезы диаметром 10 мм за 25 мин. Без компрессии это заняло бы более четырех часов. В дальнейших исследованиях необходимо изучить возможности концентрированных пучков быстрых атомов аргона для режущих инструментов из диэлектрической керамики.

Выводы

1. Пучки быстрых атомов аргона могут использоваться для удаления износостойких покрытий с режущих инструментов и других изделий.
2. Компрессия пучка быстрых атомов аргона значительно сокращает время удаления износостойких покрытий, что делает новый метод конкурентоспособным.
3. Дополнительное травление концевой фрезы быстрыми атомами аргона после удаления износостойкого покрытия значительно заостряет ее режущие кромки.
4. Новое износостойкое покрытие, нанесенное на концевую фрезу после обработки пучком быстрых атомов аргона, имеет хорошую адгезию за счет непрерывной бомбардировки быстрыми атомами в процессе нанесения.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSFS-2021-0006. При проведении работ было задействовано оборудование Центра коллективного пользования (ЦКП) Станкин (проект Министерства высшего образования РФ 075-15-2021-695).

Список литературы

1. Tobola D. The effect of the coating stripping process on regenerated tool cutting edges / D. Tobola, K. Czechowski, I. Wrońska, A. Łętocha, T. Miller // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering – 2013 – V. 61, P. 294-301.
2. Bonacchi D. Chemical stripping of ceramic films of titanium aluminum nitride from hard metal substrates / D. Bonacchi // Surf. Coat. Technol. – 2003 – V. 165, P. 35-39.
3. Rebole R. Microstructural and tribological investigations of CrN coated, wet-stripped and recoated functional substrates used for cutting and forming tools / R. Rebole // Thin Solid Films – 2004 – V. 469-470, P. 466-471.
4. Schubert E. Excimer laser assisted TiN and WC removal from tools as a novel decoating technology / E. Schubert, K. Schutte, A. Emmel, H.W. Bergmann // Proc. SPIE – 1995 – V. 2502, P. 654-663.
5. Marimuthu S. Laser removal of TiN coatigs from WC micro-tools and in process monitoring / S. Marimuthu, A.M. Kamara, D. Whitehead, P.T. Mativenga, L. Li // Optics and Laser Technology – 2010 – V. 42, P. 1233-1239.
6. Primus T. Investigation of Multiparameter Laser Stripping of AlTiN and DLC C Coatings / T. Primus, J. Hlavinka, P. Zeman // Materials – 2021 – V. 14, P. 951.

7. Kaufman H.R. Broad-beam ion sources / H.R. Kaufman // *Rev. Sci. Instrum.* – 1990 – V. 61, P. 230–235.
8. Kaufman H.R. Thirty-eight-centimeter ion source / H.R. Kaufman, W.E. Hughes, R.S. Robinson, G.R. Tompson // *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. B* – 1989 – V. 37-38, P. 98–102.
9. Hayes A.V. Fifty centimeter ion beam source / A.V. Hayes, V. Kanarov, B. Vidinsky // *Rev. Sci. Instrum.* – 1996 – V. 67, P. 1638–1641.
10. Oks E.M Low-pressure hollow-cathode glow discharge plasma for broad beam gaseous ion source / E.M. Oks, A.V. Vizir, G.Yu. Yushkov // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998 – V. 69, P. 853–855.
11. Vizir A.V. Further development of a gaseous ion source based on low-pressure hollow cathode glow / A.V. Vizir, G.Yu. Yushkov, E.M. Oks // *Rev. Sci. Instrum.* – 2000 – V. 71, P. 728–730.
12. Grigoriev S. Broad fast neutral molecule beam sources for industrial-scale beam-assisted deposition / S. Grigoriev, Yu. Melnik, A. Metel // *Surf. Coat. Technol.* – 2002 – V. 156, P. 44–49.
13. Григорьев С.Н. Компактный источник пара материала проводящей мишени, распыляемой ионами с энергией 3 кэВ при давлении 0,05 Па / С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, А.С. Метель, В.В. Панин, В.В. Прудников // *Приборы и техника эксперимента.* – 2009 – № 5. С. 127–133.
14. Metel A.; Bolbukov V.; Volosova M.; Grigoriev S.; Melnik Yu. Source of metal atoms and fast gas molecules for coating deposition on complex shaped dielectric products. *Surf. Coat. Technol.* 2013, 225, 34–39.
15. Метель А.С. Пучки быстрых нейтральных атомов и молекул в плазме газового разряда низкого давления / А.С. Метель // *Физика плазмы.* – 2012 – Т. 38. № 3. С. 281–289.

УДК 620.22

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ FMEA-АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Э.Ш. Джемилов¹,
А.И. Алиев¹,
И.О. Палаш¹,
Ф.Л. Ресутов¹**

¹*Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена проведению анализа последствий и видов потенциальных несоответствий (методология FMEA-анализа) на примере оценки дефектов, возникающих при получении и процессе эксплуатации полимерных композитных материалов и промышленных изделий из них. Для каждого вида дефекта рассчитано приоритетное число риска. Для наиболее критического дефекта предложены меры по снижению потенциальных пороков. Даны предложения по улучшению выявленных дефектных зон в структурах полимерных композитов в процессе анализа.

Ключевые слова: FMEA-анализ, анализ последствий и видов потенциальных несоответствий, контроль качества, дефект, полимерный композитный материал.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF FMEA-ANALYSIS TO STUDY THE QUALITY OF PRODUCTS FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

*E.Sh. Dzhemilov,
A.I. Aliyev,
I.O. Palash,
F.L. Resutov*

¹ *Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia*

ABSTRACT

The article is devoted to the analysis of the consequences and types of potential inconsistencies (FMEA-analysis methodology) on the example of assessing defects that occur during the production and operation of polymer composite materials and industrial products from them. For each type of defect, a priority risk number was calculated. For the most critical defect, measures are proposed to reduce potential defects. Suggestions are given for improving the identified defective zones in the structures of polymer composites during the analysis.

Keywords: FMEA-analysis, analysis of consequences and types of potential inconsistencies, quality control, defect, polymer composite material.

Введение. Почти в каждой промышленной компании на сегодняшний день существуют или отдельные сотрудники или целые отделы, занимающиеся качеством и управлением ею. Менеджмент качества на международном уровне обеспечивают специально подготовленные специалисты, обладающие новейшими методами качества, стандартизации и сертификации. Это может быть предотвращение (оценка и предотвращение риска), одновременный контроль процесса деятельности (например, внутренний аудит) или дальнейшие действия, оценка сильных и слабых сторон сайтов и постоянное повышение качества в компании.

Анализ режима и последствий отказа (FMEA) – это метод, предназначенный для определения и полного понимания возможных видов отказа и их причин, а также последствий неудачи на системы или конечных пользователей для данного продукта или процесса; оценки рисков, связанных с выявленным несоответствием; способов, последствий и причин, а также определение приоритетов проблем для разработки корректирующих действий; определение и осуществление корректирующих действий для разрешения наиболее серьезных дефектов.

FMEA-анализ – это инженерный анализ, выполняемый межфункциональной командой экспертов в отрасли, тщательно анализирующей дизайн продуктов или производственные процессы в начале процесса разработки продукта, находящей и исправляющей слабые места до того, как продукт попадет в руки клиента.

Изучение механизма и причин несоответствия, предотвращение несоответствия (или минимизация его негативных последствий), тем самым улучшение качества продукции и снижение затрат на устранение несоответствия позже, в жизненном цикле изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ), является актуальным.

Цель статьи – проведение анализа видов и последствий потенциальных несоответствий для оценки дефектов, возникающих при получении и в процессе эксплуатации полимерных композитных материалов и промышленных изделий по разработанной методологии FMEA-анализа.

Основная часть. Все дефекты композитных материалов разделены на два больших класса: производственные дефекты, которые появляются в конструкциях либо в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составных материалов компонента, и возникающие в процессе эксплуатации эксплуатационные повреждения [2].

Дефекты могут быть разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты [2].

Микродефекты – это дефекты армирующих волокон (микротрещины, микровключения, микропустоты, отклонения от формы, изломы и т.п.), дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами (микропоры, микротрещины, микровключения и т.п.), дефекты на поверхности раздела «волокно – матрица» и т.д.

Минидефекты – это искривление, разориентация волокон, царапины, вмятины, обрывы отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон.

Макродефекты – это трещины, пересекающие слои вглубь (надрезы), раковины, вмятины на поверхности композиционных материалов (КМ), дефекты ударного характера, растрескивание, расслоение, непрочейки, воздушные макровключения и т.д.

В процессе полимеризации композитов при их изготовлении из-за внутренних напряжений, неравномерного распределения связующего и других технологических факторов могут возникать расслоение, отслоение отдельных слоев, рыхлость, трещины и др. Также возможны обрывы нитей, жгутов арматуры и т.п. (рисунок 1).

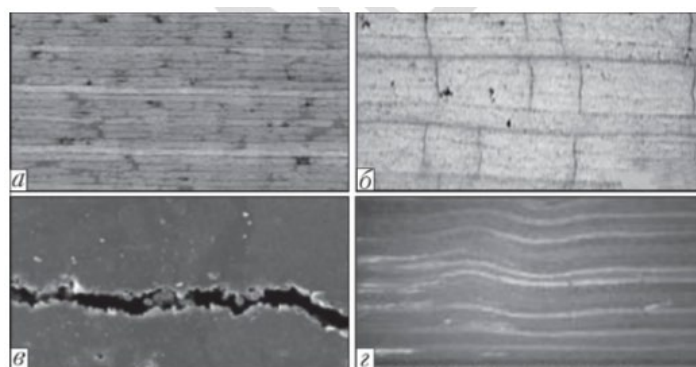


Рисунок 1. Дефекты композитных материалов: а – поры (черные); б – трещины; в – расслоение; г – волнистость

Основные типы дефектов, причины возникновения и их влияние на механические характеристики изделий из композитов достаточно подробно изложены в работе [2].

Характерные виды эксплуатационных дефектов, выявляемых при визуальном контроле, показаны на рисунке 2.

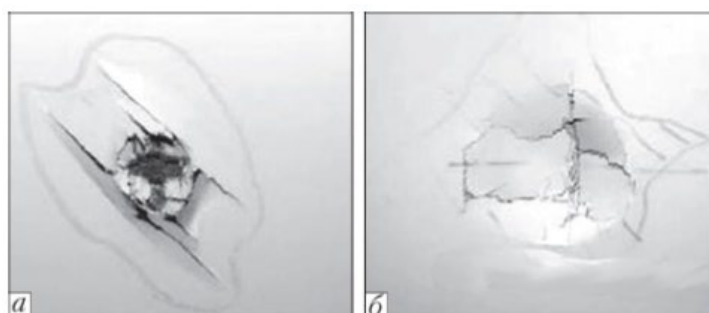


Рисунок 2. Примеры внешних повреждений композитных материалов: повреждение поверхности крыла (а) и фюзеляжа (б)

В отличие от металлических КМ [3] дефекты ПКМ в процессе эксплуатации могут быстро увеличиваться, что приводит к снижению надежности конструкции. Через поверхностную трещину матрицы влага проникает внутрь композита и разрывает его, снижает модуль упругости. Частый дефект посредством расслоения приводит к снижению прочности на сжатие, обрыв волокон, уменьшает усилие на разрыв [2].

В [4] рассмотрены дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из ПКМ, возникающих в процессе их изготовления. Для каждой группы указан вид дефекта, его визуализация, количественные и качественные показатели и причины образования. В работе [1] также приведены фотографии шлифов деталей из углепластика канала воздуховода самолета, демонстрирующие дефекты разных классификационных групп.

Наиболее опасными наиболее часто встречающимися макродефектами. неметаллических изделий и конструкций, выполненных с применением ПКМ (монолитные и клеенные конструкции, в том числе комбинированные, содержащие неметаллические и металлические слои), есть дефекты типа нарушения сплошности, например расслоения, непроклеи, трещины, большие воздушные или газовые раковины, посторонние включения, прочность в зоне которых равна или близка к нулю. Кроме того, у ПКМ возможны также дефекты на уровне микроструктуры: поры (зоны повышенной пористости), отклонения от оптимального соотношения матрицы и армирующего наполнителя, низкая степень затвердевания связующего при формовании, нарушение ориентации волокон, складки, поверхностные царапины, в зоне которых отмечается пониженная прочность материала.

Дефекты ПКМ различаются: по происхождению (возникающие на стадии изготовления, хранения, транспортировки или эксплуатации); местонахождение в детали (поверхностные, изолированные или выходные на край детали); по глубине залегания; раскрытие; по размерам структурных неоднородностей (макродефекты – размером свыше 60-100 мкм, обычно локализованные в объеме материала конструкции, и микродефекты – размером до 60-100 мкм, как правило, распределены в объеме материала или в значительной его части).

На рисунке 3 показаны фотографии шлифов деталей из углепластика, иллюстрирующие дефекты монолитных конструкций и дефекты в зоне соединения нескольких слоев [1]. Характерными дефектами деталей из ПКМ и клееных конструкций, возникающих при эксплуатации изделий авиационной техники, являются царапины (сквозное и несквозное щелевое нарушение обшивки); расслоение обшивок из ПКМ, вмятины, одно- и двусторонние пробоины в сотовых агрегатах, сквозные проколы до 4 мм; трещины и отслоение обшивок (в зонах: обшивка-соты, каркас-соты, обшивка-накладки); накопление влаги.

Усталостные разрушения структуры материала приводят к потере прочности на сжатие при статической нагрузке. Четко видимое ударное разрушение может снизить прочность на 80%, едва видимое – на 65%.

Контроль качества изделий из ПКМ необходимо проводить на протяжении всего их жизненного цикла. Под полным жизненным циклом изделия понимают время (и соответствующие ему действия), проходящее от постановки четкой задачи создания этого изделия до полного физического или морального износа и утилизации. Жизненный цикл деталей из ПКМ состоит из четырех основных этапов: проектирование, производство, эксплуатация (в том числе ремонт) и утилизация. Использование современных методов неразрушающего контроля на всех стадиях жизненного цикла изделий позволяет исключить брак и повысить долговечность деталей с ПКМ.

Для проведения исследования были использованы заготовки из полимерного композита, не соответствующие стандартным показателям (свойства занижены). Материалом этих заготовок был Флубон 20 – полимерная матрица из политетрафторэтилена и 20% волокнистого наполнителя (углеродных волокон) [5].

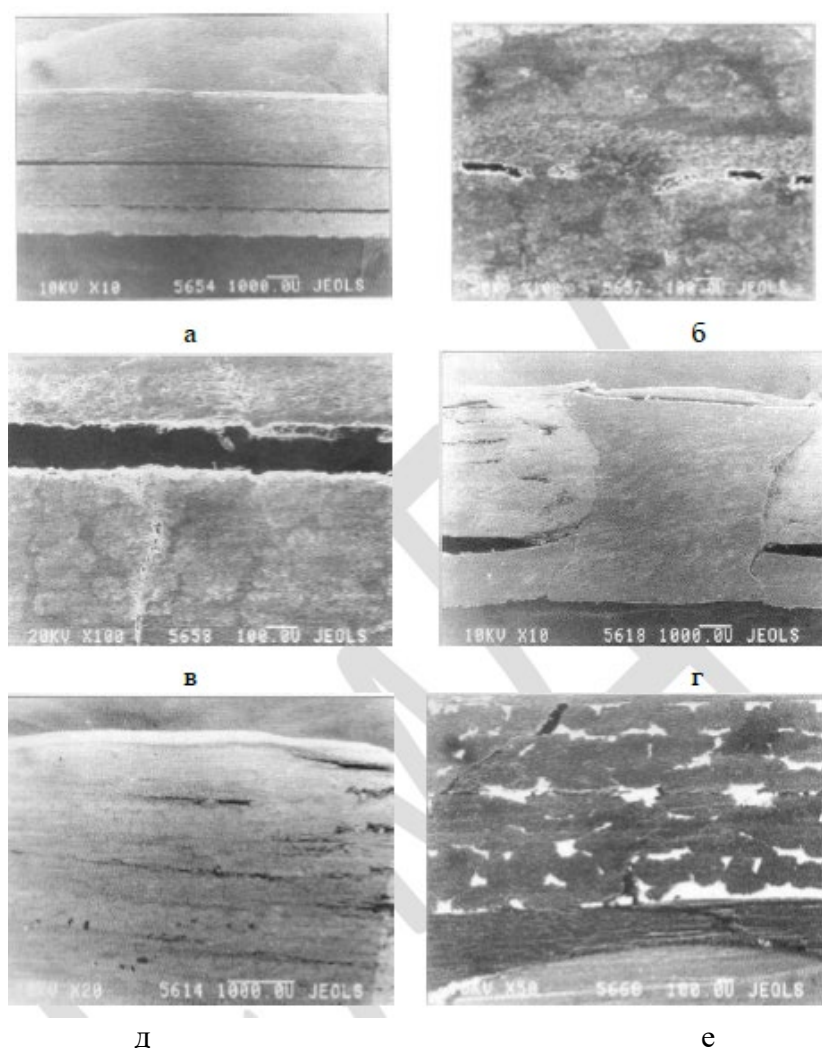


Рисунок 3. Шлифы деталей из углепластика с разными видами дефектов: а – расслоение вблизи зоны заклепочного соединения в клепаной конструкции из углепластика; б – отрывочность расслоения углепластика; в – расслоение между кольцевыми и продольными слоями углепластика с трещиной поперек слоев; г – расслоение углепластика в зоне заклепочного соединения; д – расслоение с малым раскрытием в слое углепластика; е – трещина под заклепкой (заклепка в нижней части снимка)

Визуальный анализ обработанных поверхностей исследуемых образцов позволил выявить неоднородность распределения углеродного волокна в матрице полимера (рисунок 4, а), пятнистую структуру (чередование черных и белых пятен) (рисунок 4, б), а также наличие трещин (рисунок 4, в).

При проведении испытаний на износ (рисунок 5, слева) было отмечено повышение температуры в зоне трения до 200 °С, что привело к схватыванию образца с контртелом. Это связано с низкими физико-механическими свойствами материала (низкой плотностью, неравномерностью распределения углеродного волокна в матрице), подтверждающими результаты проведенных испытаний.

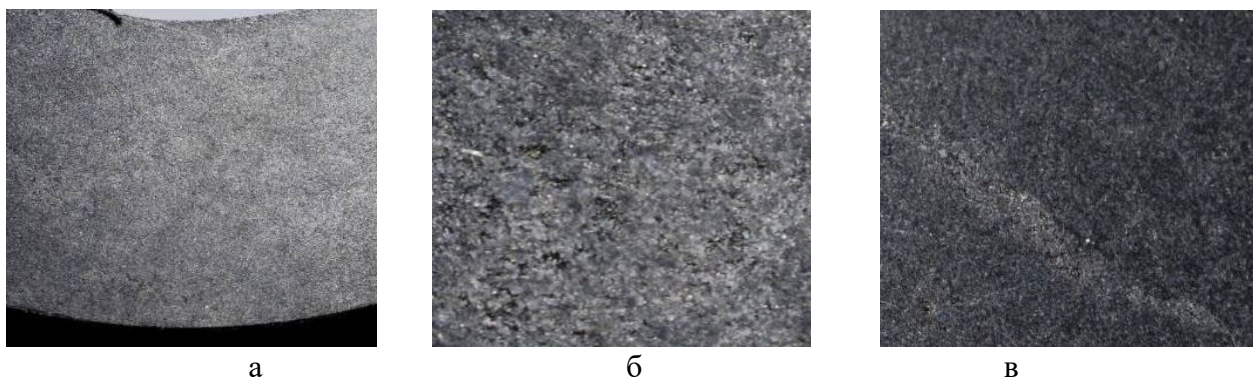


Рисунок 4. Анализ макроструктуры опытных образцов Флубона 20

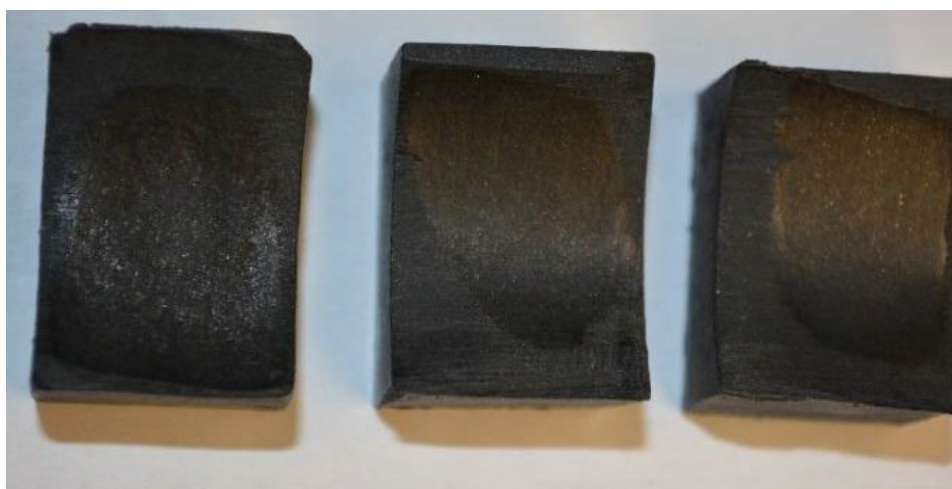


Рисунок 5. Анализ макроструктуры изношенных образцов Флубона 20

Результаты механических испытаний показали, что все образцы имеют низкое удлинение при разрыве (30-100%). Это, как правило, является результатом некачественного смешения исходных компонентов – наличия коагулированного волокна в матрице композиции.

В связи с высокой ответственностью такой продукции, изготовленной из этого материала, в промышленности необходимо было бы проверить физико-механические свойства всей партии. Это приведет к потере части материала, дополнительных материальных затрат и времени или замене всей партии.

Заключение. В результате применения разработанной FMEA-методологии для анализа видов и последствий дефектов полимерных композитов в эксплуатации было определено:

1. Приоритетное число риска (ПЧР) соответствует низкой степени отверждения связующего при формировании, а также несоответствии нормы состава материала по всему объему детали или большей его части и расслоению.

2. Уменьшение ПЧР для дефекта «Низкая степень отверждения связующего при формировании» возможно за счет усовершенствования и автоматизации систем контроля состояния степени полимеризации менее 95-98%.

3. Уменьшение ПЧР для дефекта «Нормы состава материала по всему объему детали или большей его части» возможно за счет контроля заданного значения объемного значения матрицы (V %), волокна (V %).

4. Уменьшение ПЧР для дефекта Расслоение возможно за счет усовершенствования механических и автоматизированных программ.

Список литературы

1. Бочков, К. А. Методы и средства доказывания функциональной безопасности микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте: Научно-технический журнал. – 2011.- №2. – с. 73-81.
2. Троицкий, В. А., Карманов, М. Н., Троицкая, Н. В. неразрушающий контроль качества композиционных материалов. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №3, 2014, с. 29-33.
3. Novorun, T. P., Berladir, K. V., Pererva, V. I., Rudenko, S. G., Martynov, A. I. (2017). Modern materials for automotive industry. Journal of Engineering Sciences, Vol. 4(2), pp. F8-F18, doi: 10.21272/jes.2017. 4(2). f8.
4. Мурашов, В. В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ч.1. [Электронный ресурс] / В. В. Мурашов, А. Ф. Румянцев // Контроль. Диагностика. – № 4. – 2007. – С. 1-17.
5. Budnik, A. F., Rudenko, P. V., Berladir, K. V., Budnik, O. A.: Structured Nanoobjects of Polytetrafluoroethylene Composites. J. Nano- Electron. Phys. 7(2), 02022 (2015).

УДК 621.01

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

***И.Е. Болотников¹,
Е.А. Левченко¹***

¹ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Поликристаллический кубический нитрид бора (PcBN) широко используется в промышленности в качестве режущего инструментального материала для обработки закаленных сталей, чугуна или суперсплавов на основе никеля. Для создания геометрических характеристик таких режущих инструментов лазерная абляция является новой и многообещающей технологией, которая обеспечивает обработку без износа и высокую геометрическую гибкость.

Однако влияние различных параметров лазера и длительности импульса на целостность поверхности инструментов PcBN в литературе не известно. Поэтому сначала материалы PcBN подвергаются лазерной обработке с использованием различных лазерных источников с длительностью импульса от наносекундной до фемтосекундной. Охарактеризованы лазерно-индуцированные фазовые превращения и остаточные напряжения. Выведены оптимальные параметры лазера для каждого лазерного источника. Затем представлен метод лазерной подготовки определенной микрогеометрии режущей кромки. Наконец, готовые режущие инструменты используются при обработке, закаленной стали, а производительность резания сравнивается с эталонными инструментами, обработанными традиционным способом.

Ключевые слова: абляция, микрогеометрия, лазерный источник, импульс, рабочая среда.

MANUFACTURING MICROGEOMETRY OF THE CUTTING EDGE OF END MILLS USING PULSE LASER ABLATION

***I.E. Bolotnikov¹,
E.A. Levchenko¹***

¹*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

ABSTRACT

Polycrystalline cubic boron nitride (PcBN) is widely used in industry as a cutting tool material for the machining of hardened steels, cast iron or nickel-based super alloys. For the generation of geometrical features on such cutting tools, laser ablation is a novel and promising technology, which offers wear-free processing and high geometrical flexibility. However, the influences of different laser parameters and pulse durations on the surface integrity of PcBN tools is not known in literature. Therefore, at first PcBN materials are laser processed with different laser sources ranging from nanosecond to femtosecond pulse durations. Laser induced phase transformations and residual stresses are characterized. Optimum laser parameters for each laser source are derived. Afterwards, a method for laser preparation of defined cutting edge microgeometries is presented. Lastly, the fabricated cutting tools are used in machining of hardened steel and the cutting performance is compared to conventionally machined reference tools.

Keywords: ablation, microgeometry, laser source, pulse, working environment.

Введение

Микрогеометрия режущей кромки режущего инструмента описывает переход между задней и передней поверхностью. Из-за высокой концентрации напряжений в зоне резания во время резки металла размер, и форма микрогеометрии режущей кромки имеют сильное влияние на результирующий износ фрезы. Поэтому необходимы гибкие методы производства, позволяющие создавать передовые конструкции для конкретных приложений [1-3].

Несколько механических методов, таких как шлифование и абразивно-струйная обработка, уже применяются в промышленности для получения достаточно закругленных режущих кромок. Однако эти методы имеют ограничения в отношении подготовки сверхтвердых режущих материалов, таких как поликристаллический алмаз (PCD) или поликристаллический кубический нитрид бора (PcBN). Чтобы преодолеть эти ограничения, недавно для подготовки режущих кромок инструментов из PcBN была использована импульсная лазерная абляция (PLA). Было установлено, что твердость фрез PcBN увеличивается до 20 % из-за образования твердого TiB₂ в матрице связующего, вызванного лазерное лечение нс-импульсным лазером. Увеличение твердости инструмента PcBN может быть связано с уменьшением шероховатости при точении. Однако результаты не сравниваются с результатами, полученными традиционным способом. В отличие от положительных эффектов, начиная с образования TiB₂, отрицательные влияния могут возникать в результате других преобразований материала PcBN. Было показано, что лазерная обработка, особенно в нс-диапазоне, может привести к трансформации структуры cBN из цинковой смеси в более мягкий гексагональный нитрид бора (hBN) или даже оксид бора (B₂O₃).

Наличие этих преобразований, вызванных различной лазерной подготовкой, еще не связано с режущими характеристиками инструментов PCBN. Кроме того, есть признаки того, что лазерная абляция PCBN приводит к значительным остаточным напряжениям внутри материала, вызванным различным поведением термического расширения связующих материалов и cBN. Вероятно, можно предположить, что особенно длительность лазерного импульса имеет существенное значение. влияние на лазерно-индуцированные остаточные напряжения. Таким образом, целью данного исследования является оценка влияния различных процессов лазерной абляции на целостность поверхности инструментов из PCBN и увязывание этих результатов с характеристиками режущего инструмента. На основе этого результата можно разработать соответствующие стратегии лазерной подготовки, которые можно применять для удовлетворения промышленных потребностей в области микрогеометрии режущей кромки для конкретных применений на инструментах из PCBN [4].

Основная часть

В ходе исследований использованы две коммерчески доступные марки PCBN (табл. 1). Первая марка представляет собой марку с низким содержанием cBN и керамической связкой на основе титана. Впоследствии эта марка будет называться PCBNL. Основное применение марок с низким содержанием cBN – это обработка закаленной стали в режиме непрерывного резания. Кроме того, используется вторая марка с высоким содержанием cBN и преимущественно металлическим связующим. Впоследствии этот сплав получил название PCBNH. Сплавы с высоким содержанием cBN в основном используются при обработке закаленных сталей прерывистым резом. Оба сплава PCBN поставлялись с указанной геометрией инструмента CNGA120408 [5].

Режущая кромка до лазерной подготовки была острой ($\bar{r} < 5 \mu$).

Таблица 1. Химический состав марок PCBN

Свойства оценок	Оценка L	Оценка H
содержание cBN	50 об. % (dg = 2-3 мкм)	90 об. % (dg = 2-3 мкм)
Химический состав связующего (EDX-анализ)	Оценка L	Оценка H
Al	12,2 масс. %	11,8 масс. %
Ti	80,0 масс. %	4,9 масс. %
W	7,3 масс. %	25,7 масс. %
Co	0 масс. %	39,2 масс. %
Ni	0 масс. %	18,4 масс. %
Химические соединения в связующем	TiC, AlN, WC	AlN, TiC, WC, Co, Ni, CoWB

Процессы подготовки проводились на двух разных лазерных станках (таблица 2). Основное различие между этими машинами заключается в достигаемой длительности

импульсов: от ультракоротких импульсов ($\tau = 300$ фс) до коротких импульсов ($\tau = 70$ нс). Оба станка оснащены тремя поступательными осями стола станка и двумя поступательными осями лазерной гальвосистемы. Для определения положения заготовки в станке использовались встроенные системы измерения камер. Адекватное позиционирование оси Z достигается за счет встроенной системы тактильных измерений каждого станка. Мощность лазера была предварительно откалибрована с использованием измерительного устройства Coherent© FieldMax. Целевая микрогеометрия инструмента была спроектирована с использованием NX [6-8].

Программное обеспечение Siemens© и экспортировано в stl-файл. После этого интегрированное программное обеспечение LaserSoft3D© лазерных станков было использовано для определения траекторий лазерного луча и их передачи в систему управления станком.

При исследовании различных методов подготовки лазеров обнаружено изменение флюенса одиночного импульса F_p и проводится площадной флюенс FA . Площадный флюенс FA рассчитывается путем деления накопленной энергии нескольких импульсов на сканируемую поверхность, определяемую скоростью лазерной подачи и расстоянием дорожки [9].

Данные комбинации параметров в дальнейшем будут называться P1ns-P4ns для наносекундного лазерного станка и P1fs-P4fs для фемтосекундного лазерного источника.

Все параметры значительно превышают порог абляции каждого материала PcBN и на данный момент применимы для создания микрогеометрии инструмента.

Передовые микрогеометрии исследуются с помощью микроскопа с вариацией фокуса Alicona Infinite Focus G5.

Таблица 2. Результаты исследований

	Lasertec 50 femto	Lasertec 40 P
Активная лазерная среда	Yb:YAG	Nd:YVO4
Длина волны λ	1,030 нм	1,064 нм
Длительность импульса τ	300 фс	70 нс
Диаметр фокуса df	40 мкм	36 мкм
Распределение интенсивности	Гауссовский	Гауссовский
Макс. средняя мощность P_m	18 Вт	12 Вт
Макс. энергия импульса E_p	45 мкДж	200 мкДж

Для исследования влияния лазерной абляции на микроструктуру используется сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Zeiss EVO 60 VP. РЭМ оснащен энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения для анализа химического состава поверхности образцов. Для анализа кристаллографической структуры обработанного лазером PcBN были проведены измерения. Спектры комбинационного рассеяния анализировались с использованием спектрометра Bruker Senterra с длиной волны возбуждения $= 532$ нм, интенсивностью луча $P = 10$ мВт и размером фокусного пятна $dfocus = 5$ мкм. Положение поперечного фона PcBN в спектрах комбинационного рассеяния света было дополнительно исследовано для анализа остаточного напряженного состояния материалов PcBN. Положение пика определялось с использованием методов фильтра Савацкого-Голея и алгоритма подгонки пика. После этого положение пика сравнивали с положением без напряжений $X = 1054,7$ см⁻¹. Результирующее остаточное напряжение было затем рассчитано с использованием

приведенных пропорциональных коэффициентов Sanjurjo et. Эксперименты по резанию проводились при резке закаленной подшипниковой стали 100Cr6 (58HRC) на токарном станке EMCOTURN E65. Заготовки поставлялись в виде цилиндрических деталей ($D = 165$ мм) с цельным центром ($D_i = 90$ мм) с перерывами на резку и без них. Для прерываний реза по окружности заготовки были обработаны шесть равномерно расположенных канавок.

Результаты и их обсуждение

Прежде чем применять лазерную абляцию для обработки режущей кромки микрогеометрии, основные исследования лазерно-индуцированных изменений поверхности материалов PcBN проводятся с помощью ns-лазера (рис. 1) и fs-лазера (рис. 2).

Таким образом, был создан альтернативный метод сфокусированного ионного пучка для создания поперечных сечений материала после лазерной абляции. Перед лазерной абляцией образцы разделяли с помощью отрезной шлифовки. После этого полученные сечения полировались алмазной полировальной пастой для достижения зеркальной чистоты поверхности и удаления возможной зоны теплового воздействия отрезной шлифовки. После этого поперечные сечения образца снова спрессовывались механическим давлением в заранее сконструированном приспособлении. В дальнейшем лазерная абляция выполнялась с лазерными дорожками, идущими ортогонально линии отсечки (рис. 1). Наконец, образцы снова разъединяли, чтобы на поперечном сечении была видна зона воздействия лазера. В ходе исследований были проанализированы обе марки PcBN [10].

Плотность энергии для каждого лазерного источника варьировалась, чтобы выявить влияние энергии лазерного импульса на тепловой отклик материалов PcBN. Результаты ns-лазерной абляции представлены на (рис. 1).

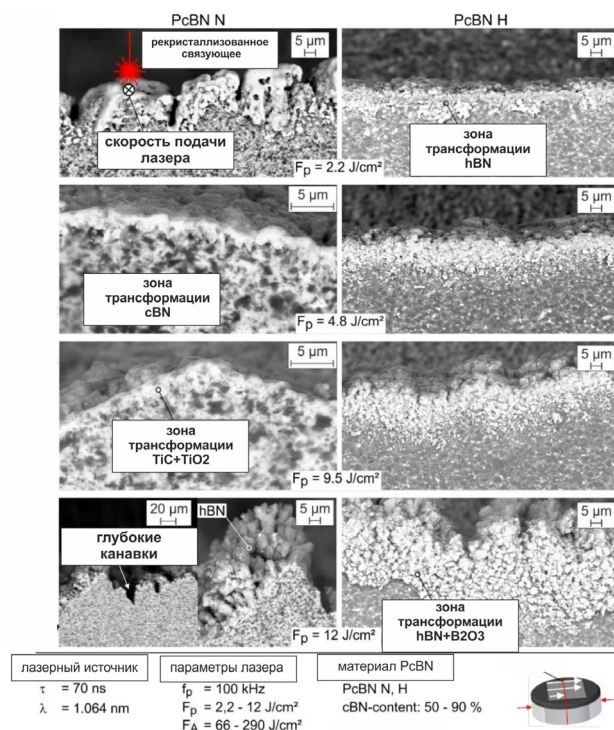


Рисунок 1. СЭМ-изображения лазерно-индуцированной модификации поверхности материалов PcBN при ns-лазерной абляции

Для марки PcBN N с низким содержанием PcBN низкая плотность энергии одиночного импульса приводит к накоплению мусора на поверхности образцов. Этот мусор характеризуется высоким содержанием титана.

Следовательно, образование обломков можно объяснить плавлением и рекристаллизацией связующих материалов. Основной механизм заключается в том, что низкая введенная лазерная энергия препятствует полной сублимации матрицы связующего TiC из-за ее высоких температур плавления и испарения.

Если плотность лазерного импульса увеличить до $F_p = 4,8 \text{ Дж/см}^2$, получится однородная структура поверхности с небольшой зоной термического влияния.

Применение очень высокой плотности лазерного импульса $F_p = 12 \text{ Дж/см}^2$ снова приводит к образованию значительной трансформационной микроструктуры на поверхности образцов. Однако полученная структура не плотная и гладкая, как зона термического воздействия при малой флюенсности импульса, а пористая и неоднородная [1, 8].

С помощью спектроскопии можно было установить, что микроструктура состоит из hBN, а также с высоким содержанием титана. Соединение с неповрежденной поверхностью хрупкое и имеет несколько трещин по исследованным сечениям. Таким образом, можно сделать вывод, что применение высокой лазерной энергии приводит к превращению cBN в hBN. Кроме того, аналогичные исследования проводятся для PCBN H с высоким содержанием cBN.

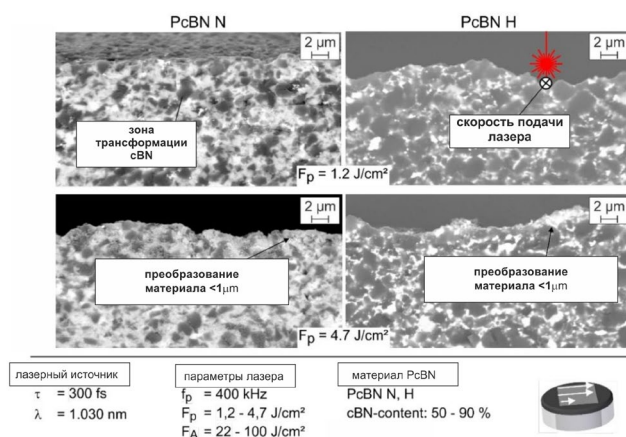


Рисунок 2. СЭМ-изображения лазерно-индуцированной модификации поверхности материалов PcBN для fs-лазерной абляции

Во-первых, очевидно, что при низкой плотности импульса не происходит значительной рекристаллизации связующего из-за пониженного содержания связующего и состава металлического связующего с более низкой температурой плавления по сравнению с керамическими связующими. Тем не менее на поверхности образцов обнаруживается зона термического влияния, состоящая из hBN. Таким образом, превращение cBN в hBN смещается в сторону более низкой плотности энергии для PcBN N марки H по сравнению с N. Возможной причиной, основанной на абляционном поведении керамики, такой как TiC, может быть сильное плазменное образование для PcBN N, что приводит к более высокому поглощению энергии индуцированной лазерной плазмы. Это может привести к увеличению энергии, вносимой в зерна cBN, что приведет к прямому преобразованию в hBN для марки с высоким содержанием cBN. Увеличение энергии лазерного импульса приводит к непрерывному росту зоны термического влияния и, в конечном итоге, к превращению в B₂O₃. Эта реакция

окисления возможна благодаря присутствию hBN, который имеет значительно более низкую химическую стабильность по сравнению с cBN.

Можно заключить, что при нс-лазерной абляции на поверхности материалов PcBN возникают значительные зоны трансформации. Что касается марок с низким содержанием PcBN, то средняя плотность энергии одиночного импульса предпочтительна, поскольку предотвращается рекристаллизация связующего. Однако после значения примерно 9,5 Дж/см² происходит превращение в hBN, что, как ожидается, окажет негативное влияние на твердость материалов. Кроме того, для высоких марок PcBN следует выбирать низкую плотность энергии одиночного импульса, чтобы уменьшить размер зоны трансформации hBN [6].

Дополнительно исследуется поведение абляции с использованием источников fs-лазера (рис. 2). Использование этих ультракоротких лазерных импульсов приводит к незначительным изменениям микроструктуры поверхности независимо от рассматриваемой марки PcBN. На представленных изображениях СЭМ $F_p = 4,7$ Дж/см² представляет собой максимально возможную плотность импульса для лазерного станка. Таким образом, fs-лазерная абляция существенно предотвращает поверхностные изменения при лазерной абляции PcBN.

На основании полученных результатов были выбраны параметры лазера для подготовки режущей кромки (табл. 3).

В частности, что касается ps-лазера, параметры процесса выбираются со средней и высокой плотностью энергии одиночного импульса, чтобы исследовать влияние возможного повреждения материала на режим резания.

Таблица 3. Применяемые параметры лазера при подготовке режущей кромки фрезы

Наносекундный лазер	Плотность одиночного импульса F_p [Дж/см ²]	Площадная плотность энергии F_A [Дж/см ²]
Настройка параметров 1 (P1ns)	6.4	51
Настройка параметров 2 (P2ns)	10.2	81
Настройка параметров 3 (P3ns)	6.4	142
Настройка параметров 4 (P4ns)	10.2	227
Фемтосекундный лазер		
Настройка параметров 1 (P1fs)	2.6	25
Настройка параметров 2 (P2fs)	3,9	37,5
Настройка параметров 3 (P3fs)	2.6	100
Настройка параметров 4 (P4fs)	3,9	150

Геометрия после лазерной абляции представлена на (рис. 3) в сравнении с обычной микрогеометрией, полученной шлифованием. Для обеих марок РсВН видно, что увеличение энергии лазера приводит к тенденции к образованию канавок для применяемого источника ns-лазера. Причина такого поведения – более крутой абляционный кратер ns-лазера. Это вызвано низкой плотностью энергии по краям диаметра лазерного фокуса, что приводит к малой глубине локальной абляции. Достигнутые результаты с помощью fs-лазера позволяют добиться более высокого качества режущей кромки обоих материалов РсВН с очень низким образованием канавок [7].

Для режущих кромок фрезы, обработанных ns-лазером, низкая плотность лазерной энергии для Р1ns и Р2ns приводит к доминированию TiC в спектрах, что, вероятно, вызвано небольшой зоной рекристаллизованной связки на поверхности. Увеличение энергии лазера для установок Р3ns и Р4ns вызывает значительную трансформацию микроструктуры сВН в hВН. Как и ожидалось на (рис. 2), режущие кромки, подготовленные с помощью фс-лазерного станка, не показывают никаких изменений в отношении микроструктуры, а только доминирующие пики сВН.

Состояние остаточного напряжения для марки с низким содержанием РсВН является растягивающим с максимальным остаточным напряжением $\sigma_{\text{растяжение}} = 500$ МПа.

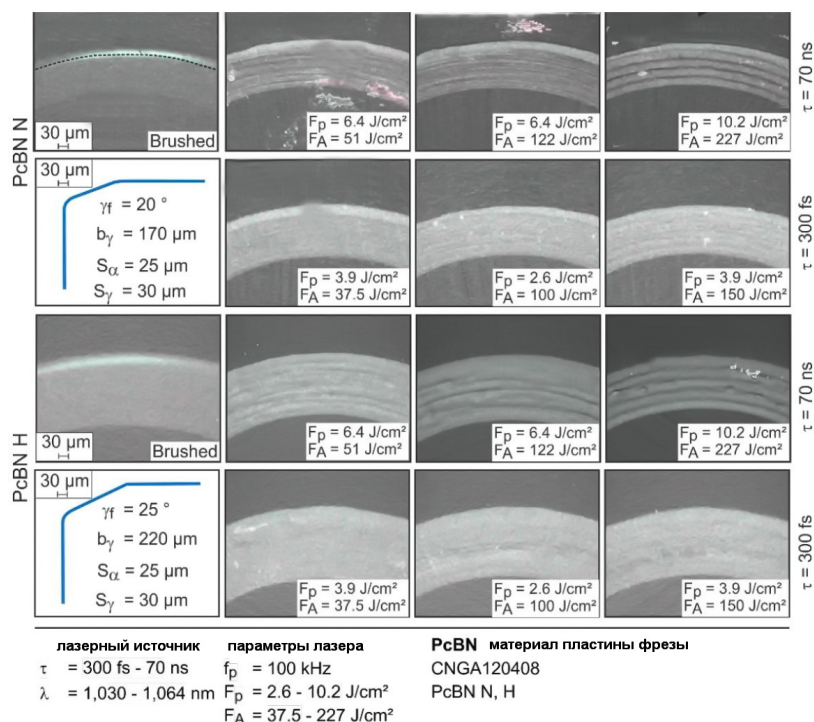


Рисунок 3. Режущие кромки фрезы РсВН N и РсВН H, обработанные лазером

Режущие кромки, подготовленные с помощью фемтосекундного лазера, почти не содержат напряжений вплоть до низких остаточных напряжений сжатия. Таким образом, делается вывод, что поведение абляции с применением ns-лазера приводит не только к увеличению зоны термического влияния, но также к увеличению остаточного напряжения растяжения, вызванного различными коэффициентами теплового расширения связующего. Благодаря прямой сублимации, ожидаемой для fs-лазера, не возникает соответствующих растягивающих или сжимающих напряжений. Следует отметить, что положение пика не

удалось измерить для всех образцов, приготовленных с помощью ns-лазера, из-за доминирования hBN или TiC в рамановском сигнале. Для сравнения пиковое положение инструмента из PcBN, приготовленный традиционным способом, имел $X = 1061 \text{ см}^{-1}$, что указывает на более сильное сжимающее остаточное напряжение, вызванное механической обработкой [9].

Для PcBN на (рис. 4) исследовано только положение пика комбинационного рассеяния поперечного фонона cBN. Полученные спектры комбинационного рассеяния содержат пики hBN и cBN для ns-лазерной абляции и только пики cBN для fs-лазерной абляции. Для обеих длительностей приложенного лазерного импульса очевидна четкая тенденция к смещению остаточного напряжения в более низкое сжимающее или даже растягивающее состояние. Однако все остаточные напряжения, достигнутые при фс-лазерной абляции, являются сжимающими, тогда как ns-лазерная абляция приводит к растягивающим напряжениям во всех комбинациях параметров. Результирующее остаточное растягивающее напряжение при ns-лазерной абляции сравнимо с PcBN марки N по максимальным значениям. Лазерная абляция материала PcBN явно приводит к возникновению остаточных напряжений растяжения, которые, как ожидается, окажут негативное влияние на поведение резания, например, на распространение трещин. Использование сверхкоротких импульсов позволяет избежать растягивающих напряжений, а в некоторых случаях даже приводит к сжимающим напряжениям. Однако сжимающие остаточные напряжения, вызванные механической обработкой, выше по сравнению с напряжениями после лазерной абляции.

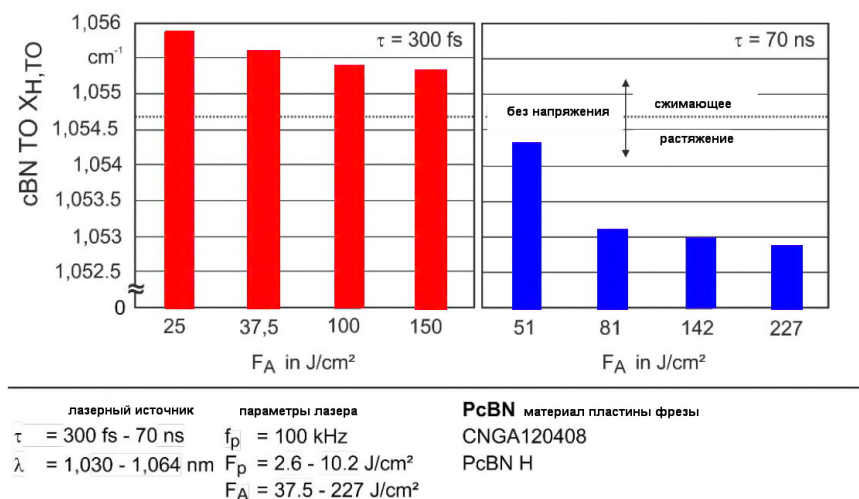


Рисунок 4. Остаточное напряженное состояние на передней поверхности пластины для PcBN

В дальнейшем фрезы применялись в экспериментах по резанию закаленной стали. Режущие инструменты из PcBN N использовались для непрерывной обработки, тогда как PcBN H применялись для прерывистого резания. При непрерывном резании были обнаружены лишь незначительные различия в режущих характеристиках применяемых инструментов [5].

Причиной такого поведения является интенсивный кратерный износ передней поверхности, который удаляет возможную зону термического воздействия на передней поверхности во время начального износа. Поэтому далее обсуждаются только результаты для прерывистого разреза с PcBN H. Результирующая динамика износа инструмента представлена на (рис. 5), на (рис. 6) представлены СЭМ-изображения достигнутых характеристик износа.

Для фрез, обработанных фс-лазером, достигается такая же производительность резки, как и у режущих инструментов, изготовленных традиционным способом, независимо от

подводимой энергии лазера. Это согласуется с результатами исследований, показывающими лишь незначительные различия, а также остаточное напряжение сжатия и фазовое превращение.

Применение ns-лазерной абляции приводит к значительному сколу кромки, если энергия лазера превышает параметры P_{1ns} . Таким образом, повреждение поверхности, вызванное ns-лазерной абляцией, оказывает существенное влияние на режущие характеристики режущих инструментов из PcBN при прерывистом резании.

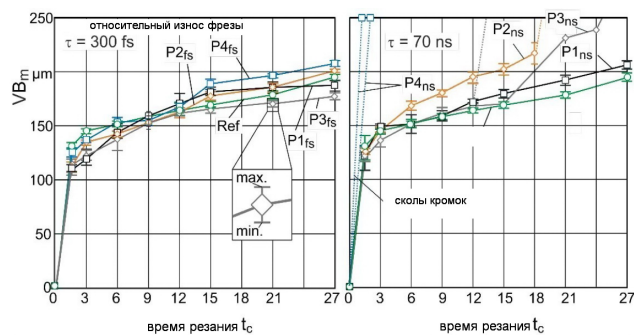


Рисунок 5. Динамика износа инструмента при прерывистом резании закаленной стали

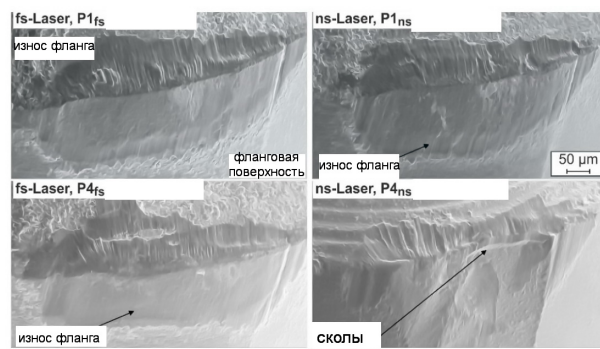


Рисунок 6. Износ инструмента при прерывистом резании закаленной стали после времени резания $t = 27$ мин

Заключение

На основании результатов можно констатировать, что длительность приложенного импульса существенно влияет на целостность поверхности инструментов из PcBN. Изменения целостности поверхности, такие как фазовые превращения (cBN в hBN) и остаточные напряжения растяжения, измерялись с помощью SEM и рамановской спектроскопии, а затем связывались с производительностью резания. При подготовке режущей кромки с помощью ns-лазерных импульсов невозможно избежать повреждения поверхности, что имеет решающее значение при обработке закаленной стали прерывистым резом. Если длительность импульса находится в режиме fs, полностью исключаются изменения поверхности, что приводит к производительности резания, равной характеристикам инструментов, подготовленных традиционным способом. Таким образом, можно показать, что лазерная абляция ультракороткоимпульсным лазером Sources представляет собой инновационный подход к созданию ультрасовременной микрогеометрии с высокой точностью и геометрической гибкостью.

Список литературы

1. Григорьев С.Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С.Н. Григорьев, В.П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 378 с.
2. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий: в 2 кн.. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

4. Верещака А.С., Табаков В.П., Вахминцев В.П., Твердосплавные инструменты с нитридититановыми покрытиями. – М: Станки и инструменты, 2003. – 394с.
5. Григорьев С.Н. Технологии вакуумно-плазменной обработки инструмента и деталей машин: учебник / С.Н. Григорьев, Н.А. Воронин. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К, 2005. – 508 с.
6. Воркунов Р.Ю. Фемтосекундная абляция наночастиц меди и серебра в воде / Р.Ю. Воркунов, В.В. Брюханов // Известия КГТУ. – 2013. – Т. 31 – С. 23-29.
7. Калитеевская Н.А., Коньков О.И., Теруков Е.И., Сейсян Р.П. Исследование порога абляции для аморфных алмазоподобных пленок под действием излучения ArF эксимерного лазера // Письма в журнал технической физики. – 2000. – Т. 26. – № 23. – С. 1024–1027.
8. Долгаев С.И., Лялин А.А., Симакин А.В., Шафеев Г.А. Растворение сапфира в сверхкритической жидкости как механизм лазерной абляции // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – № 7. – С. 593–597.
9. Каск Н.Е., Мичурин С.В., Федоров Г.М. Перколяция и спектры свечения лазерной плазмы при абляции кремния и кремнийсодержащих композитов // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – № 5. – С. 435–439.
10. Кононенко Т.В., Конов В.И., Гарвов С.В. и др. Сравнительное исследование абляции материалов фемтосекундными и пико/наносекундными лазерными импульсами // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 28. – № 8. – С. 167–172.

УДК 621.91.7

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ РАЗВЕРТЫВАНИЕМ

***В.В. Скакун¹,
И.Э. Теминдаров¹,
Э.Р. Исмаилов¹,
В.В. Матюхин¹***

¹Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова, Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследований, направленные на повышение размерной точности и качества обработанной поверхности при развертывании заготовки из стали 45 путем выбора смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Размерная точность оценивалась по отклонениям круглости и прямолинейности обработанных отверстий, а качество – параметром шероховатости.

Ключевые слова: развертывание, смазочно-охлаждающая технологическая среда, круглость, прямолинейность, шероховатость.

ENSURING DIMENSIONAL ACCURACY AND QUALITY OF HOLING WORKING BY REAMING

V.V. Skakun¹,
I.E. Temindarov¹,
E.R. Ismailov¹,
V.V. Matyukhin¹

¹ Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov, Simferopol, Russia

ABSTRACT

The article presents the results of research aimed at improving the dimensional accuracy and quality of the machined surface when reaming a workpiece made of steel 45 by choosing cutting fluids. Dimensional accuracy was evaluated by the deviations of the roundness and straightness of the machined holes, and the quality was evaluated by the roughness parameter.

Keywords: reaming, cutting fluid, roundness, straightness, roughness.

Введение

Изделия, производимые на машиностроительных предприятиях, должны отвечать требованиям потенциальных потребителей. Одним из направлений улучшения изделия является повышение качества и точности обработки его поверхностей, особенно внутренних, от которых зависит функциональность и безотказность в процессе эксплуатации. Обеспечение точности размера и формы обрабатываемого отверстия является сложным и трудоемким процессом, что обусловлено меньшей жесткостью режущего инструмента [8]. Формирование внутренних поверхностей осуществляется различными методами обработки, среди которых наиболее распространенными на производстве являются зенкерование и развертывание. Поэтому основной задачей по дальнейшему повышению качества обработки отверстий является совершенствование процессов получистовой и чистовой обработки. Многие исследования, направленные на решение задач повышения точности, виброустойчивости и производительности обработки отверстий мерными концевыми инструментами выполняются управлением перемещениями инструмента в плоскости, перпендикулярной его оси за счет оптимизации конструктивных параметров, ориентации колебательной системы, режимов резания и применения прогрессивных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Проведение экспериментальных исследований, определяющих действие СОТС при обработке отверстий для получения требуемой точности и качества имеет актуальное значение.

Основная часть

Для проведения исследований в качестве оборудования использовался радиально-сверлильный станок мод. 2К522 (рисунок 1). Применяемый режущий инструмент – развертка машинная из стали Р6М5, обрабатываемый материал – сталь 45 (НВ 229) ГОСТ 1050–88 (рисунок 2). В качестве смазочно-охлаждающих сред были выбраны масло минеральное И-20, масло подсолнечное и жир животного происхождения (свиной). Режимы резания были приняты производственные для чернового развертывания: частота вращения шпинделя – 500 об/мин, подача шпинделя – 0,32 мм/об.



Рисунок 1. Радиально-сверлильный станок модели 2K522

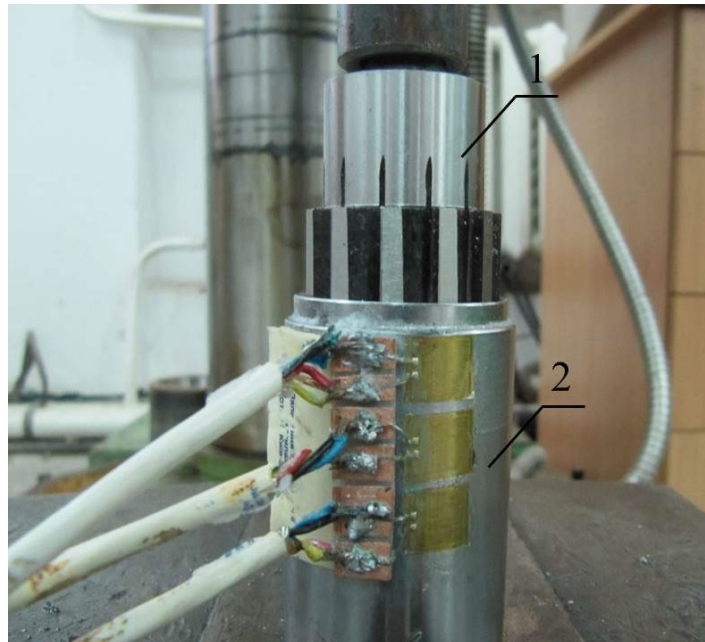


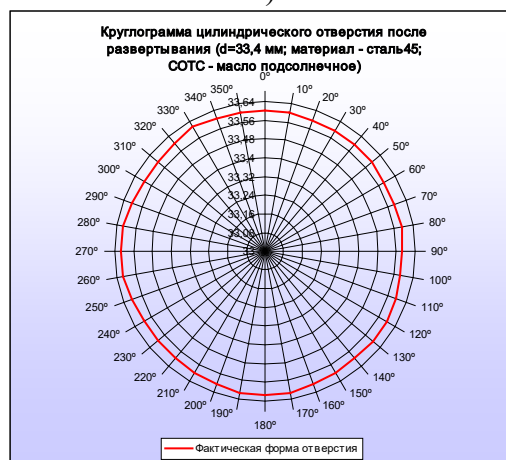
Рисунок 2. Экспериментальный стенд:

1 – Режущий инструмент и 2 – Обрабатываемый материал

После развертывания размерная точность определялась по двум параметрам: отклонение от круглости цилиндрического отверстия в поперечном сечении и прямолинейность образующей. По полученным результатам построены круглограммы, характеризующие отклонения от круглости (рисунок 3) и прямолинейности образующей цилиндрических отверстий (рисунок 4).



а)



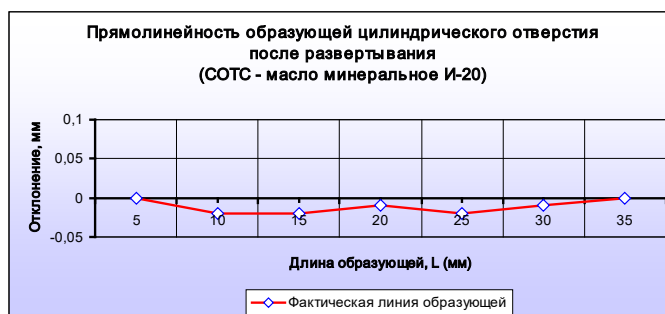
б)



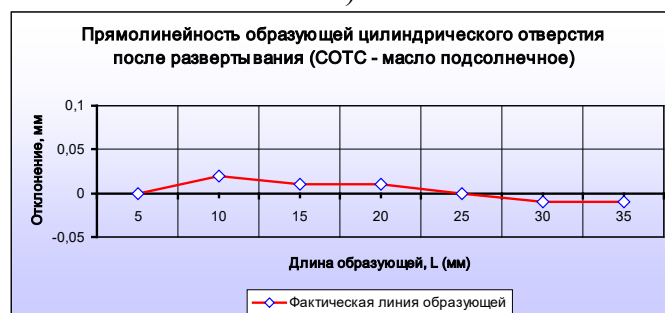
в)

Рисунок 3. Отклонение от круглости цилиндрического отверстия: а) после развертывания с СОТС – масло минеральное И-20; б) после развертывания с СОТС – масло подсолнечное; в) после развертывания с СОТС – жир свиной

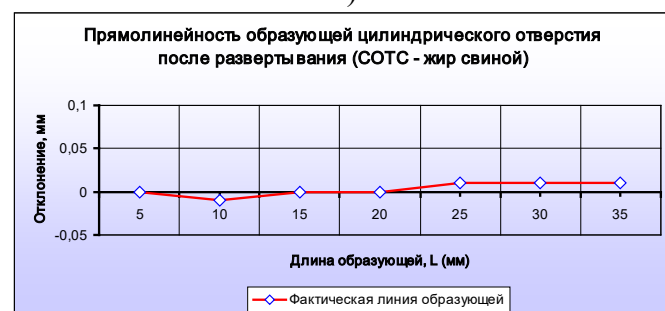
Полученные круглограммы показывают, что отклонение от круглости не изменяется и находится в пределах допуска, в независимости от применяемого СОТС.



а)



б)



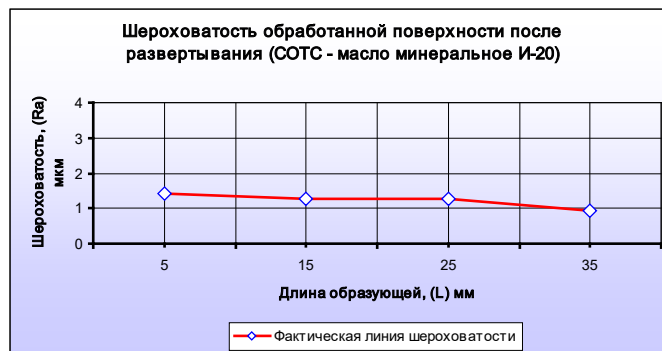
в)

Рисунок 4. Отклонение прямолинейности цилиндрического отверстия: а) после разvertyвания с СОТС – масло минеральное И-20; б) после разvertyвания с СОТС – масло подсолнечное; в) после разvertyвания с СОТС – жир свиной

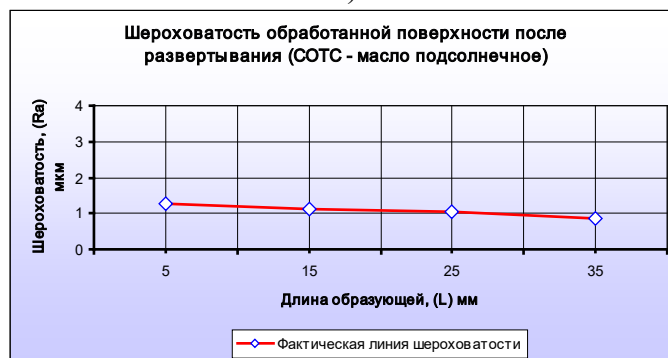
Экспериментальные линии прямолинейности образующей показывают, что наименьшие отклонения получены при разvertyвании с применением СОТС свиного жира.

Качество обработанной поверхности оценивалось параметром шероховатости, измеряемым на портативном профилометре TR 200, имеющим программное обеспечение. По полученным данным построены графики шероховатости вдоль образующей обработанного отверстия (рисунок 5).

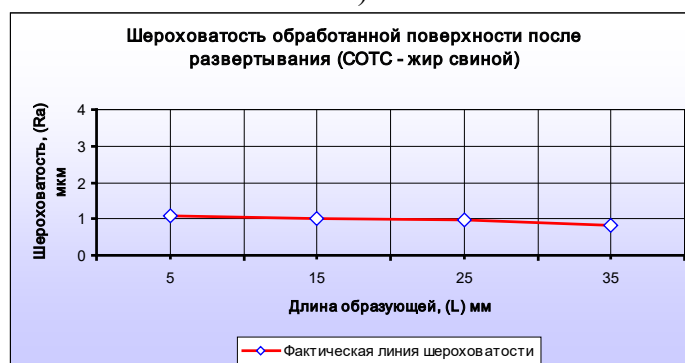
Результаты шероховатости, представленные на рисунке 5, показывают незначительное уменьшение величины микронеровности поверхности вдоль образующей цилиндрического отверстия при использовании свиного жира.



а)



б)



в)

Рисунок 5. Шероховатость поверхности образующей цилиндрического отверстия после развертывания: а) после развертывания с СОТС – масло минеральное И-20; б) после развертывания с СОТС – масло подсолнечное; в) после развертывания с СОТС – жир свиной

Закключение. Полученные результаты исследования, показали, что отклонение от круглости не изменяется и находится в пределах допуска, в независимости от применяемого СОТС; отклонение прямолинейности незначительно уменьшилось при применении в качестве СОТС животного (свиного) жира; параметры шероховатости вдоль образующей цилиндрического отверстия составили: с маслом минеральным И-20 – $Ra = 0,923 \div 1,419$ мкм; с маслом подсолнечным – $Ra = 0,852 \div 1,254$ мкм; с животным (свиным) жиром – $Ra = 0,831 \div 1,093$ мкм.

Список литературы

1. Андреев, Г. С. Исследование процессов зенкерования и развертывания аустенитной стали типа ЭИ-69: дис. канд. техн. наук / Г. С. Андреев – М., 1952.
2. Белов, Б. Н. Шероховатость поверхности и точность развернутых отверстий в сталях / Б. Н. Белов – М. : Известия вузов, Машиностроение, № 6, 1965.
3. Белоус, Ю. Д. Исследование процесса развертывания отверстий в заготовках из мягких углеродистых сталей: дис. канд. техн. наук / Ю. Д. Белоус – УПИ, Свердловск, 1973.
4. Варфоломеев, Д. И. Исследование точности развертывания отверстий при качающемся закреплении разверток: дис. канд. техн. наук / Д. И. Варфоломеев – М., 1968.
5. Железнов, Г. С. Влияние погрешности установки развертки на точность обработки / Г. С. Железнов, С. А. Сингеев – М.: 1982, с. 25 – 26. – (Станки и инструмент, № 9).
6. Махнев, В. М. Исследование процесса резания сталей твердосплавными развертками: дис. канд. техн. наук / В. М. Махнев – Иркутск, 1961.
7. Резников, А. Н. Исследование процесса зенкерования и развертывания: дис. канд. техн. наук / А. Н. Резников – Куйбышев, 1944.
8. Холмогорцев, Ю. П. Оптимизация процессов обработки отверстий / Ю. П. Холмогорцев – М. : Машиностроение, 1984. – 184 с.

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ АЛМАЗНОГО И ЭЛЬБОРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ НА СТРУКТУРНО-НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ

*Т.В. Стадник¹,
А.В. Пахалюк¹,
А.В. Харитонов¹*

¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Существенное влияние на процесс обработки оказывает материал шлифовального круга и его выбор является актуальной задачей. По сравнению с абразивными методами шлифования более высокие точность и качество поверхностного слоя изделия достигается при использовании шлифовального инструмента из сверхтвёрдых материалов. В статье приводятся результаты исследований влияния алмазного и эльборового шлифования на структуру и напряженное состояние стали в поверхностных слоях деталей и влияния этих видов обработки на усталостную прочность. Повышение усталостной прочности стали после алмазного и эльборового шлифования объясняется благоприятной структурой и оптимальным физико-механическим состоянием поверхностных слоев деталей, а также отсутствием дефектов в виде прижогов и микротрещин, возникающих при электрокорундовом шлифовании.

Ключевые слова: алмазное шлифование, усталостная прочность, физико-механические свойства.

INFLUENCE OF DIAMOND AND CBN GRINDING ON THE STRUCTURAL STRESS STATE AND FATIGUE STRENGTH OF STEEL

*T.V. Stadnik¹,
A.V. Pakhaliuk¹,
A.V. Haritonov¹*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The material of the grinding wheel has a significant influence on the grinding process, and its selection is an urgent task. Compared to abrasive grinding methods, higher accuracy and quality of the surface layer of the product is achieved when using grinding tools made of superhard materials. The article presents the results of studies of the influence of diamond and CBN grinding on the structure and stress state of steel in the surface layers of parts and the influence of these types of grinding on fatigue strength. The increase in fatigue strength of steel after diamond and CBN grinding is explained by the favorable structure and optimal physical and mechanical state of the surface layers of parts, as well as the absence of defects in the form of burns and microcracks that occur during electrocorundum grinding.

Keywords: diamond grinding, fatigue strength, physical and mechanical properties.

Постановка проблемы. В связи с усложнением современных конструкций, ужесточением режимов эксплуатации современной техники детали из конструкционных материалов, используемых в машиностроении, авиастроении и других отраслях, очень часто работают в условиях циклических знакопеременных нагрузок. Анализ поломок деталей машин и конструкций показывает, что в следствии накопления повреждений в металле в условиях действия переменных нагрузок, происходит усталостное разрушение [1, 2].

На современном этапе при производстве конкурентноспособных изделий постоянно возрастают требования к качеству и точности обработки. Окончательное формирование качества поверхностного слоя деталей машин и механизмов происходит на финишных операциях. Одним из наиболее распространенных и производительных методов финишной обработки высокоточных деталей и инструментов является шлифование [3-5]. Наряду с изменением микрогеометрии поверхности в процессе шлифования происходят изменения физико-механических свойств. За счет силового воздействия инструмента поверхностный слой заготовки пластически деформируется, в нем повышается температура, что приводит к фазовым превращениям [6-9].

В настоящее время в машиностроении широкое распространение получили детали из труднообрабатываемых материалов, которые обладают рядом преимуществ, главными из которых являются повышенная износостойкость, теплостойкость и др. При шлифовании таких материалов отмечается повышенная склонность к образованию прижогов и трещин со значительной толщиной дефектного слоя, что снижает усталостную прочность. [10-11]. Существенное влияние на процесс обработки оказывает материал шлифовального круга и его выбор является актуальной задачей. По сравнению с абразивными методами шлифования более высокие точность и качество поверхностного слоя изделия достигается при использовании шлифовального инструмента из сверхтвёрдых материалов. [11-12]. Несмотря на широкое использование алмазных и эльборовых кругов для заточки и доводки твердосплавного инструмента, в настоящее время эти круги не находят широкого применения для шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов [13-17].

Цель статьи заключается в оценке влияния алмазного и эльборового шлифования на структуру и напряженное состояние стали в поверхностных слоях деталей и влияния этих видов обработки на усталостную прочность.

Изложение основного материала. Исследования проводили на закаленных сталях X18H10T, 40X, ШХ15 и ШХ15Ч (условное обозначение подшипниковой стали, выплавленной из чистой шихты с последующим двойным вакуумным переплавом). Образцы для шлифования подвергали термической обработке: сталь 40X – закалка от температуры 840-850°C в масло, отпуск 180°C (HRC 49-50); сталь ШХ15 – закалка от температуры 840-850°C в масло, отпуск 150°C (HRC 60-62); сталь X18H10T закалка от температуры 1050-1080°C в воду, отпуск 600°C (HB 137). Во всех случаях отпуск производили в течение двух часов. Шлифование выполняли на станке Knuth RSM 500 CNC с применением охлаждающей среды алмазными AC15 200/160 B2-01 100%, эльборовыми ЛКВ40 200/160 B2-01 100% и электрокорундовыми 25A F80 L 6 V 50 Б 3 кругами. Режимы шлифования: скорость круга 40 м/с, скорость детали 0,5 м/с, продольная подача 0,15 в долях ширины круга на оборот, поперечная подача 0,006 мм/двойной ход. Микрогеометрию поверхности измеряли на профилометре Mitutoyo Surftest SJ-210.

В работе исследовали следующие физико-механические свойства: электросопротивление, коэрцитивную силу, блоки мозаики, количество остаточного аустенита, циклическую прочность, а также остаточные напряжения первого рода.

Металлографические исследования сталей 40X и ШХ15 показали, что в поверхностных слоях образцов после электрокорундового шлифования имеет место вторичный отпуск, в то время как после алмазного и эльборового зона отпуска не отмечалась. Микроструктура исходной стали 40X состояла из среднеигольчатого мартенсита и остаточного аустенита, стали ШХ15 – мелкодисперсного мартенсита, сложных карбидов (Fe, Cr)₃C и остаточного аустенита.

В поверхностных слоях образцов из стали X18H10T (металлографический анализ стали X18H10T производили как непосредственно после шлифования, так после шлифования с последующим отжигом в вакууме) после электрокорундового и эльборового шлифования отмечался слой пластической деформации (10-12 мкм) с характерной текстурой зерен в направлении вектора скорости резания; после алмазного шлифования этот слой был значительно меньше (2-3 мкм). Микроструктура исходной стали состояла из аустенита, единичных карбидов и карбонитридов титана. После алмазного шлифования в поверхностных слоях образцов отмечалось увеличение количества карбидов в результате диффузии углерода в поверхностные слои образцов. Измерение микро-ТЭДС образцов после алмазного шлифования подтверждает диффузию углерода в поверхностные слои; ТЭДС смещается в отрицательную сторону. Диффузия углерода при алмазном шлифовании подтверждается также и измерением электросопротивления. После электрокорундового шлифования количество углерода в поверхностных слоях уменьшается. Эльборовое шлифование не вызывает существенных изменений микроструктуры стали.

Рентгенографические исследования базового состава стали 40X показывают, что после алмазного шлифования происходит уменьшение количества остаточного аустенита. На рентгенограммах этой стали линии остаточного аустенита не отмечались. Фазовый анализ стали ШХ15 показал, что количество остаточного аустенита уменьшилось с 12% (исходная структура) до 6%.

Преобразование остаточного аустенита в мартенсит, выделение из мартенсита углерода и образование мелкодисперсных карбидов при алмазном и эльборовом шлифовании приводит к увеличению коэрцитивной силы. При этом эльборовое шлифование увеличивает коэрцитивную силу больше, чем алмазное (ШХ15, 40X). Электрокорундовое шлифование вызывает более высокие температуры и давления в зоне микрорезания, что приводит к отпуску структуры и росту карбидов, выше критической величины и снижению коэрцитивной силы.

Анализ рентгенограмм поверхностных слоев образцов закаленной стали 40X и ШХ15 после алмазного, эльборового шлифования показывает различную степень размытости линий остаточного аустенита, что связано с пластической деформацией, размерами зерен, величиной блоков, искажениями первого и второго рода. Алмазное и эльборовое шлифование по сравнению с электрокорундовым приводит к уменьшению блоков мозаики, образованию сжимающих напряжений и упрочнению стали. Уменьшение количества остаточного аустенита в стали и дробление блоков после алмазного и эльборового шлифования приводит к увеличению удельных объемов поверхностных слоев деталей и образованию сжимающих остаточных напряжений. Исследование остаточных напряжений показали, что максимальные сжимающие напряжения наблюдаются после алмазного шлифования. Электрокорундовое шлифование формирует растягивающие напряжения. Последнее объясняется укрупнением блоков, увеличением количества остаточного аустенита и отпуском стали.

В процессе алмазного шлифования, благодаря лучшим режущим свойствам алмазных зерен, большей теплопроводности и уменьшению коэффициента трения алмаза с увеличением нагрузки возникают меньшие температуры и давления по сравнению с электрокорундовым. Это обуславливает формирование благоприятного физико-механического состояния (уменьшение остаточного аустенита дробление блоков, сжимающие остаточные напряжения) и повышение их эксплуатационных свойств, в частности, циклической прочности. Испытания на усталость чистым изгибом, проводившиеся на машине гидравлической DC HD25-B (при базе $2 \cdot 10^7$ циклов, частота нагружения 50 Гц), показали, что предел выносливости образцов после алмазного и эльборового шлифования выше, чем после шлифования электрокорундовым кругом (40X и ШХ15), несмотря на то, что чистота поверхности после электрокорундового шлифования была на 1 - 2 разряда выше. Шлифование эльборовыми кругами стали X18H10T не показало заметного повышения циклической прочности, а даже снижение по сравнению с электрокорундовым (рис. 1а, б, в, г).

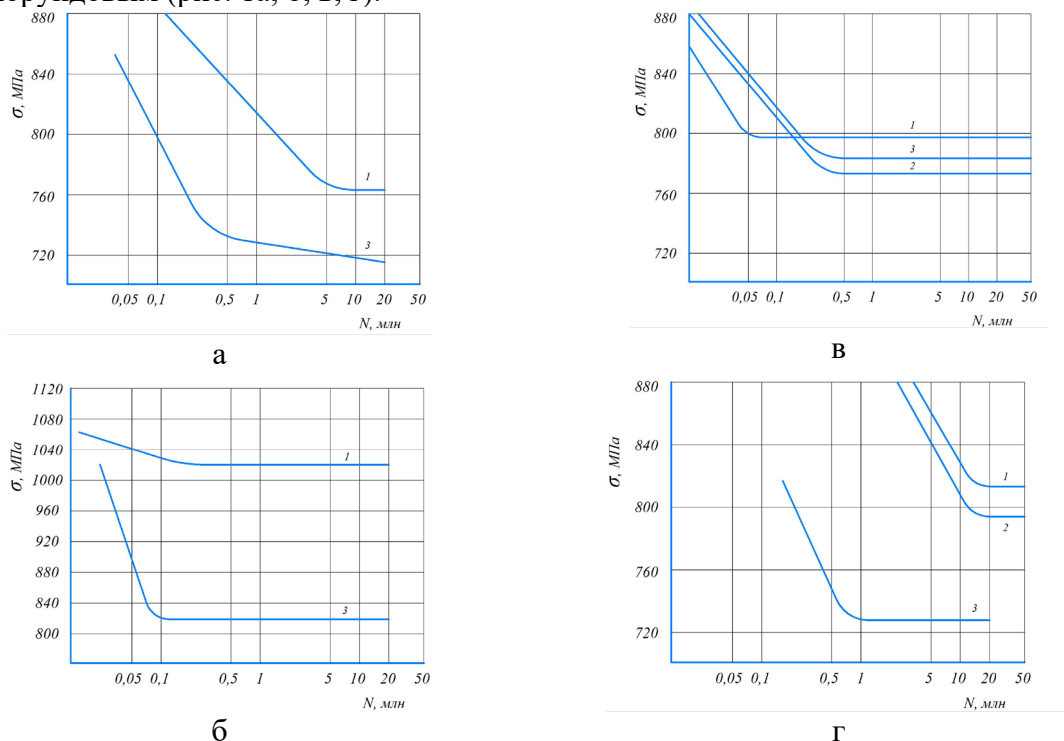


Рисунок 1. Кривые усталости стали ШХ15 (а); ШХ15Ч (б); X18H10T (в); 40X (г); 1 – алмазное; 2 – эльборовое; 3 – электрокорундовое шлифование.

Выводы. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что алмазное и эльборовое шлифование труднообрабатываемых сталей и сплавов является более эффективным по сравнению с электрокорундовым. Повышение усталостной прочности стали после алмазного и эльборового шлифования объясняется благоприятной структурой и оптимальным физико-механическим состоянием поверхностных слоев деталей, а также отсутствием дефектов в виде прижогов и микротрещин, возникающих при электрокорундовом шлифовании.

Список литературы

1. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов: [Монография] / В. Ф. Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 287 с.
2. Мыльников В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография / В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Шетулов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. –177 с.
3. Bratan S. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Chasovitina // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037. – P. 384–389.
4. Stadnik T. Investigation of diamond elastic belts characteristics effect on rotary belt grinding process output performance / Stadnik T., Sidorov D., Kharchenko A. // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, 2017. – Vol. 206.– P. 1415–1418.
5. Абдулгасис Д. У. Оценка целесообразности применения алмазных шлифовальных кругов для обработки твердых сплавов в режиме глубинного шлифования / Д. У. Абдулгасис, У. А. Абдулгасис, С. М. Братан // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 3 (77). – С. 123-128.
6. Дымченко И.А. Физико-механические свойства поверхностных слоев деталей после шлифования мелкозернистыми кругами / И.А. Дымченко, Д.А. Лысенко, С.М. Братан // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2023. – № 1 (79). – С. 223-227.
7. Носенко В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – 2-е изд., стер. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2019. – 616 с.
8. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
9. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с. – ISBN 978-617-612-051-3.
10. Свитковский Ф. Ю. Исследование закономерностей и повышения эффективности процесса шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов / Ф. Ю. Свитковский, Т. Н. Иванова // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. – 2004. – № 1(22). – С. 22-24.
11. Белякова А. Ф. Исследование влияния химического состава и структуры труднообрабатываемых сталей на обрабатываемость при шлифовании / А. Ф. Белякова, Т. Н. Иванова, И. Н. Санников // Естественные и технические науки. - 2012. - № 3 (59). - С. 165-172.
12. Иванова Т. И. Исследование обрабатываемости труднообрабатываемых сталей при шлифовании / Т. П. Иванова, Д. Д. Галиханов // Естественные и технические науки. – 2012. - № 3 (59). – С. 173-176.
13. Васильев Е.В. Алмазное шлифование твердосплавных пластин / Е.В. Васильев, А.Ю. Попов, Д.С. Реченко // СТИН, 2012. – № 5. – С. 7-10.

14. Попов А. Ю. Повышение эффективности твердосплавного финишного лезвийного инструмента сверхскоростным затачиванием: монография / А. Ю. Попов, Д. С. Реченко; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. – 280 с.
15. Реченко Д.С. Обработка титановых и жаропрочных сплавов высокоскоростным шлифованием. Омский научный вестник. – 2009. – №4(73). – С. 59-61.
16. Резников А. Н. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
17. Malkin S., Guo C. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. – New York: Industrial Press, 2008. – 372 p.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

