

П. Е. Жарков, к.т.н., доцент, академик УТА, вице-президент, Лауреат Государственной премии (Концерн «NICMAS», г. Сумы, Украина), В. Б. Тарельник, д.т.н., проф., А. А. Носко, аспирант (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

Упрочнение металлорежущего инструмента методом электроэрозионного легирования

В работе представлена проблема повышения долговечности и надежности металлорежущего инструмента, проанализированы условия его работы и виды износа. Описано современное состояние теории и практики технологии электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), используемого для повышения износостойкости. Представлено необходимое оборудование для упрочнения инструмента методом ЭЭЛ, предложены наиболее перспективные материалы легирующих электродов, приведены результаты сравнительных производственных испытаний.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, электроэрозионное легирование, упрочненный слой, износостойкость, микротвердость, шероховатость, сплошность.

В роботі представлена проблема підвищення довговічності та надійності металоріжучого інструмента, аналізуються умови його роботи та види вимірюваності. Описано сучасний стан теорії та практики технології електроерозійного легування (ЕЭЛ), що використовується для підвищення зносостійкості. Представлено необхідне обладнання для укріплення інструменту методом ЕЭЛ, запропоновані найбільш перспективні матеріали легуючих електродів, приведені результати порівняльних виробничих випробувань.

Ключові слова: металоріжучий інструмент, електроерозійне легування, ущільнений шар, зносостійкість, мікрохвилюваність, шорсткість, нерівність.

The paper presents the problem of increasing the durability and reliability of the metal cutting tool, analyzing the conditions of its operation and types of wear. The present state of the theory and practice of the technology of electroerosion alloying (EEL), used to increase wear resistance, is described. The necessary equipment for hardening of the tool by the EEL method is presented, the most promising materials of the alloying electrodes are offered, the results of comparative production tests are given.

Keywords: metal cutting tool, electroerosion alloy, hardened layer, wear-resistance, microhardness, roughness, solidity.

Key words: method, face impulse seal, quality improvement, metallic rings, secondary seal, coating, electroerosion alloying.

Введение

Большинство ответственных деталей промышленного оборудования работает при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях абразивного, коррозионного и других видов воздействия рабочих сред. Повышение надежности и долговечности этих деталей обеспечивается, как правило, применением труднообрабатываемых коррозионно-стойких сталей, что обуславливает большой расход металлорежущего инструмента. Применение традиционных методов повышения режущих свойств инструментов за счет сложного легирования инструментальных материалов в настоящее время в большой степени ограничено из-за дефицитности ряда элементов. Особенно остро эта ситуация проявляется в Украине, которая не располагает такими необходимыми элементами для высоколегированных сплавов, используемых в производстве металлорежущих инструментов, как никель, хром, ванадий, молибден, вольфрам. В связи с этим актуальной задачей является создание принципиально новых инструментальных материалов (композиционных), типа «основа – покрытие» которые обладают повышенной поверхностной износостойкостью и относительно высокой прочностью и вязкостью.

Большое распространение в промышленности получили износостойкие покрытия режущей части инструмента, карбидами и нитридами титана, молибдена, ниобия, циркония, окиси алюминия, благодаря чему создаются слои с различными свойствами. Идея многослойного инструмента и в таком виде дает большой эффект, однако обеспечить таким путем самозатачивание инструмента пока не удается.

Постановка проблемы. Анализ основных достижений и публикаций

подавляющее большинство применяющихся ин-

струментов изготовлено из двух групп инструментальных материалов - быстрорежущей стали и твердых сплавов. Другими основными группами материалов для режущих инструментов являются углеродистые и низколегированные стали, литые сплавы на основе кобальта, минералокерамика и алмазы [1].

Режущий инструмент может подвергаться адгезионному, абразивному, диффузионному, химическому, окислительному и другим видам износа, которые зависят от условий резания [2-4].

Адгезионный износ инструмента заключается в отрыве или срезе мельчайших частиц инструментального материала под действием сил адгезии, возникающих в процессе трения контактных поверхностей инструмента и обрабатываемой детали [5-7]. Под адгезионным понимают все виды межмолекулярного взаимодействия между твердыми телами [8, 9]. Этот вид износа может быть обнаружен и изучен только на металлографических шлифах. Интенсивность адгезионного износа зависит от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, а также условий обработки: скорости и температуры резания, отношения прочности инструмента к прочности обрабатываемой детали [3, 7, 9].

Абразивное воздействие интуитивно считается основной причиной износа, и в литературе по этому вопросу часто описывается износ инструмента в целом, как абразивный износ, однако это та область, которая требует дальнейших исследований при нормальных условиях резания. Там, где в материале заготовки имеется большая концентрация твердых частиц, как, например, заполненные песком раковины на поверхности отливок, несомненно, имеет место абразивный износ [10]. При такой концентрации твердых частиц их действие аналогично работе шлифовального круга.

Наличие металлического контакта и достаточно

высокая температура обуславливают возможность протекания диффузионного процесса [11]. Поэтому может происходить износ инструмента за счет диффузии атомов металла и углерода из инструмента в материал заготовки и уноса их потоком сходящего по поверхности материала. Скорость диффузии повышается с ростом температуры.

Высокая степень пластической деформации поверхностных слоев, образование неравновесных дефектов при пластической деформации в сотни раз ускоряет процесс диффузии [7]; это ускорение пропорционально скорости деформирования, т.е. мгновенной концентрации вакансий. Непрерывное обновление контактных поверхностей приводит к резкому ускорению диффузионного износа, так как скорость растворения все время соответствует начальному периоду диффузии, которая необычайно велика [12].

Наблюдения показали, что форма инструмента может изменяться как за счет износа, так и за счет пластической деформации. Отличие заключается в том, что процесс износа влечет за собой некоторую потерю металла с поверхности инструмента, хотя он может также сопровождаться местной пластической деформацией.

В [5] утверждается, что процесс резания считается процессом превалирующего пластического деформирования. От пластической деформации зависят тепловой режим и контактные нагрузки на рабочих поверхностях инструмента, а следовательно, интенсивность и характер износа. При нагреве инструмента до температуры 900 - 1200 ° в его поверхностных слоях начинается пластическое течение металла. Оно совершается под действием зацепления микронеровностей, впадины между которыми заполнены обрабатываемым материалом, постоянно перемещающимся по поверхностям инструмента.

В [3] предлагается создание принципиально новых инструментальных материалов, так называемых композиционных, которые обладают повышенной поверхностной износостойкостью и относительно высокой прочностью, а также вязкостью. Задавая свойства покрытия путем варьирования его химического состава и строения, можно изменять основные характеристики процесса резания и, в конечном итоге, управлять важнейшими выходными параметрами процесса - износом инструмента и качеством поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Кроме того, процесс нанесения покрытия позволяет, направлено воздействовать на поверхностные дефекты инструментального материала.

Проблема износа металлорежущего инструмента не должна рассматриваться изолированно от общей проблемы трения и изнашивания. В настоящее время многими исследователями доказано, что при резании металлов происходит процесс внешнего трения, осложненный рядом специфических особенностей. Этот факт имеет большое значение, так как, основываясь на нем, трение при резании можно включить в общую классификацию видов внешнего трения [13].

Один из наиболее эффективных методов повышения износостойкости режущего инструмента – электроэрозионное легирование (ЭЭЛ). Процесс ЭЭЛ заключается в переносе и осаждении эродируемого материала анода инструмента на поверхности катода-детали или насыщение (легирование) поверхностного слоя катода элементами, входящими в состав материала анода [14].

С появлением метода ЭЭЛ упрочнение металлорежущего инструмента явилось первой областью его применения. При этом использовалась возможность повышения твердости и износостойкости стального инструмента, в том числе и закаленного. Упрочнению подвергаются режущие грани инструмента, менее изнашивающиеся при работе, чтобы создать условия, близкие к его самозаточке. ЭЭЛ упрочняют резцы, фрезы, развертки, пилы по металлу и др.

Таким образом, **целью** работы является повышение износостойкости металлорежущего инструмента, упрочненного методом ЭЭЛ, путем проведения исследований его упрочненных поверхностных слоев, сформированных применением различных видов электродных материалов в лабораторных и промышленных условиях.

Методика и результаты проведенных исследований

Электроэрозионные процессы при ЭЭЛ, как правило, оцениваются по величинам эрозии анода на катод (или привесу катода). Привес катода определяет производительность процесса или интенсивность роста слоя покрытия на катоде-детали. Наиболее существенно влияют на эти процессы параметры разряда, свойства материала электродов, материал подложки, продолжительность легирования и другие факторы.

Когда происходит полярный перенос материала анода на поверхность катода, то взаимодействие материалов электродов осуществляется в условиях высоких температур, давлений и сопровождающих их структурных и фазовых превращений, диффузионных процессов, термических напряжений, т.е. более сложных физических явлений, определяющих конечные результаты ЭЭЛ.

Следовательно, исследование и анализ процессов, происходящих на электродах, позволяет получить не только общую физическую картину ЭЭЛ, но и оценить его технологические возможности, а также найти новые области применения.

Исследование массопереноса и шероховатости покрытий в зависимости от режима ЭЭЛ и материалов анода (электрода) и катода (детали), проводилось на стационарной и переносной установках с ручным вибратором модели, соответственно, «УИЛВ-8» и «УИЛВ-8А» (рис. 1). Установки различаются исполнением и не отличаются режимами работы. Основные режимы их работы приведены в табл. 1. Для емкости накопительного конденсатора $C = 20$ мкФ и $C = 300$ мкФ установка имеет по 8 режимов работы.

Эрозия анода и привес катода определялись на аналитических весах "ВЛА-200" с точностью до 0,0001г. Шероховатость легированной поверхности измеряли на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путём снятия и обработки профилограмм.

Исследования поверхностного металлического слоя образцов, упрочненных на ручной установке ЭЭЛ "УИЛВ-8", проводилось на растровом электронном мик-



Рис. 1. Установки электроэрозионного легирования:
а – стационарная «ЭИЛ-8», б – переносная: «ЭИЛ-8А».

Таблица 1. Режимы работы установок ЭЭЛ «УИЛВ-8» и «УИЛВ-8А» и наиболее рациональное время легирования

Номер режима	U _{х.х.} , В	J _{кз} , А		Время легирования t, мин		Мощность разряда N _p , Вт	
		C=20 мкФ	C=300 мкФ	C=20 мкФ	C=300 мкФ	C=20 мкФ	C=300 мкФ
1	38,5	0,2-0,4	1,0-1,4	7-8	4-5	11,5	48,1
2	48,2	0,4-0,5	1,4-1,6	7-8	3-4	21,7	72,3
3	56,1	0,5-0,6	1,6-2,0	6-7	3-4	30,9	101,0
4	62,8	0,6-0,7	1,8-2,0	5-6	2-3	40,8	119,3
5	68,7	0,7-0,8	2,0-2,2	4-5	1-2	51,5	144,3
6	73,6	0,8-0,9	2,2-2,4	4-5	1-1,5	62,6	169,3
7	78,6	0,9-1,0	2,4-2,6	3-4	0,5-1	74,7	196,5
8	83,4	1,0-1,2	2,6-2,8	3-4	0,5-1	91,7	225,2

роскопе-анализаторе "РЭММА-200" Сумского ПО "Электрон". При этом проводился топографический анализ наиболее характерных участков поверхности и качественный рентгеновский микроанализ сформированного покрытия для идентификации основных элементов в нем.

Для исследования структуры и измерения микротвердости поверхностного слоя использовали шлифы образцов после ЭЭЛ. Поверхность шлифа была ориентирована перпендикулярно к поверхности электроэрозионного упрочнения. Перед изготовлением шлифа для исключения краевого эффекта при легировании торец образца фрезеровали на глубину не менее 2 мм. Для предупреждения скалывания слоя, завалов края образец крепили с контргелом в струбцине. Затем шлиф подвергался химическому травлению для выявления структуры в реактиве в соответствии с материалом основы.

После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе "Неофот-2", где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя - диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н.

Материалы, применяемые для исследования, подразделяются на материалы для катода (детали) и материалы для анода (легирующего электрода).

В данной работе ставилась задача исследования влияния ЭЭЛ применительно к режущему инструменту, для которого классическим представителем является быстрорежущая сталь Р6М5. Это высоко и сложнолегированная сталь, где сумма легирующих элементов доходит до 16-18%. Она содержит в своём составе такие легирующие элементы, как вольфрам, молибден, хром, ванадий. Твердость её после окончательной термообработки составляет до

64 НРС.

На данной стали изучались закономерности формирования структуры поверхностного слоя после ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами.

В качестве анода использовались чистые металлы, углерод (графит различных марок) и твёрдые сплавы. В данном случае подразумевалось проследить влияние качественно различных материалов на структурообразование поверхностного слоя при ЭЭЛ. Используемые для исследований материалы анода, а также некоторые их физико-механические свойства занесены в табл. 2.

Износостойкость металлорежущего инструмента с различными покрытиями или упрочненного различными методами исследовалась в лабораторных условиях и в условиях производства.

Так, в лабораторных условиях, с помощью инструментального микроскопа, периодически измерялся износ режущей кромки испытываемого инструмента (например, износ задней поверхности зуба концевой фрезы) и по полученным данным строились графики износа от времени испытаний.

Испытания в производственных условиях позволили накопить статистические данные по выбору как метода упрочнения, так и материала покрытия металлорежущего инструмента, применяемого для обработки тех или иных материалов (например, титановых сплавов, труднообрабатываемых высоколегированных нержавеющих сталей, цветных сплавов и др.).

При исследовании влияния режимов ЭЭЛ на структуру и свойства формируемых покрытий нами установлено, что для обеспечения качественного покрытия необходимо правильно выбрать наиболее рациональное время легирования. Оно должно быть несколько меньшим или равным времени, за которое достигается максимальный привес на катоде, и меньше времени, при котором начинается разрушаться сформированный слой.

Длительность легирования на одном режиме не влияет на показатель шероховатости, а определяет количество перенесенного материала с анода на катод, сплошность и толщину покрытия. С увеличением длительности ЭЭЛ возрастает количество перенесенного материала с анода на катод, увеличиваются сплошность и толщина покрытия.

При ЭЭЛ предпочтение следует отдавать непрерывному легированию, обеспечивающему по сравнению с циклическим большой привес на катоде.

Таблица 2. Физико-механические свойства материалов, применяемых при ЭЭЛ в качестве анода (легирующего электрода)

Марка материала	Температура плавления, °С	Твердость	Кристаллическая решетка	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ , град ⁻¹
Твердый сплав ВК8	-	88,5 НРА	Гексагональная	5,0	5,1
Твердый сплав Т15К6	-	90,2 НРА	Гексагональная/ кубическая	12,5	5,6
Графит (С)	3747	3,06 НV	Гексагональная	268	27
Хром	1860	52 НРА	О.Ц.К.	88,6	6,2
Вольфрам	3480	65 НРА	О.Ц.К.	150	4,3
Молибден	2620	55 НРА	О.Ц.К.	138	5
Никель	1455	100НВ	Г.Ц.К	67	13,2

Наиболее рациональным режимом для большинства использованных твердых износостойких материалов является режим, когда ток короткого замыкания $J_{к.з} = 2,1$ А, напряжение холостого хода $U_{х.х} = 68,7$ В при ёмкости накопительного конденсатора $C = 300$ мкФ, обеспечивающий в сочетании с большой толщиной белого слоя (25-30 мкм) относительно высокую микротвёрдость, как белого слоя ($H_{\mu} = 7500-12000$ МПа), так и ЗТВ ($H_{\mu} = 400-5500$ МПа). Наиболее рациональное время легирования составляет 1-0,5 см²/мин.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно отметить, что все материалы по увеличению количества перенесенного вещества располагаются в ряд: молибден, хром, ВК8, Т15К6, никель.

С увеличением длительности легирования существует ограничение по количеству переносимого на катод материала анода (электрода), причем чем больше мощность разряда, тем быстрее наступает максимум по привесу катода. Рациональное время легирования поверхности стали Р6М5, в зависимости от энергетических параметров работы установок представлено в табл. 1.

В качестве наиболее предпочтительных материалов электрода при ЭЭЛ можно рекомендовать: графит, хром, молибден и твёрдые сплавы ВК8 и Т15К6, обеспечивающих наиболее стабильные результаты на всех режимах легирования по массопереносу и сравнительно низкую шероховатость поверхности.

Сравнительное исследование структуры и свойств упрочненного слоя в среде воздуха и аргона показывает, что существенного влияния нейтральной среды по сравнению с окислительной не замечено.

Ниже, в табл. 3, представлены сводные данные результатов металлографических исследований поверхностных слоев образцов стали Р6М5, сформированных при ЭЭЛ электродами из твердых износостойких материалов.

Металлографический анализ строения и свойств слоя после ЭЭЛ быстрорежущей стали Р6М5 позволил выявить некоторые особенности в структурообразовании поверхностного слоя.

Так, при ЭЭЛ стали Р6М5 твердым сплавом ВК8, структуру слоя представляют светлые не травящиеся участки ($H_{\mu} = 6700, 7500, 8000$ МПа) и поля с коричневым оттенком ($H_{\mu} \leq 7000$ МПа). При легировании твердым сплавом Т15К6 ситуация подобная. Микротвердость основного металла $H_{\mu} = 7850$ МПа, слоя $H_{\mu} = 6000$ МПа. Участки типа эвтектики имеют микротвердость $H_{\mu} = 6000 - 6700$ МПа. Присутствуют изолированные включения с микротвердостью около 15000 МПа. Аналогичная ситуация и при легировании хромом: микро-

твёрдость поверхностного слоя $H_{\mu} = 6000-8000$ МПа. Причины этого явления требуют дополнительного изучения с учетом того, что микротвердость термически обработанной быстрорежущей стали находится в пределах 7500-9000 МПа и даже при ЭЭЛ простой углеродистой стали, возможно, достижение микротвердости слоя более 10000 МПа. В то же время при легировании быстрорежущей стали графитом поверхностный слой приобретает более высокую микротвёрдость (порядка 10000-12000 МПа).

На основании полученных данных механизм формирования структуры поверхностного слоя при ЭЭЛ быстрорежущей стали различными электродами ориентировочно можно представить следующим образом. При легировании чистыми металлами и твердыми сплавами существенного переноса материала анода (электрода) и нанесения его в чистом виде на поверхность катода не происходит. Это означает, что не следует ожидать формирования слоя со свойствами материала анода. Так как все процессы структурообразования проходят в основном через жидкую фазу, то не следует ожидать, что упрочненный слой будет иметь свойства твердого сплава.

В данном случае общий механизм структурообразования при ЭЭЛ на установках средней мощности разряда – сверхскоростной разогрев поверхностей катода и анода. При этом разогрев происходит с образованием жидкой фазы на поверхности катода и внедрением в образовавшуюся жидкую ванну атомов элементов анода под действием электростатических сил в ионизированном пространстве. Таким образом, происходит дополнительное легирование. По окончании действия импульса разряда происходит кристаллизация жидкой легированной ванны со сверхвысокой скоростью за счёт отвода тепла в массу катода с образованием сложных структур поверхностного слоя. Вследствие скоростной закалки и дополнительного легирования в высоколегированной подложке быстрорежущей стали образуется большое количество остаточного аустенита, приводящего к снижению микротвердости.

Однако при более жестких режимах или при влиянии дополнительных факторов возможно совмещение данного механизма с переносом вещества анода (типа «осколков» карбидов основы твердосплавного электрода) и внедрение его в образующуюся жидкую ванну катода. Отсюда, вероятно, и выявляются на общем фоне в поверхностном слое изолированные островки-включения с высокой твердостью порядка 15000 МПа.

При легировании графитом наблюдается несколько иная картина. Как известно, при ЭЭЛ углеродом (графитом) в поверхностном слое происходит образование

всей гаммы структурных составляющих согласно диаграммы состояния железо-углерод. При электроэрозионном разряде в месте его воздействия возникает жидкая ванна, которая вследствие того, что анод оказывается активным поставщиком атомов углерода, насыщается этими атомами. При этом происходят науглероживание слоя и образование дополнительного количества карбидов с легирующими элементами основы. Поэтому поверхностный слой имеет весьма высокую микротвердость.

Рентгеноструктурный

Таблица 3. Результаты металлографических исследований поверхностного слоя стали Р6М5 после ЭЭЛ твердыми износостойкими материалами

Материал электрода	Толщина, мкм		Характеристика слоя (режим, среда легирования, особенности структуры)
	Микротвердость, МПа		
	подслоя	белого слоя	
Хром	$\frac{15}{7850}$	$\frac{20}{\text{до } 8000}$	300 мкФ, воздух, слой равномерный
Твердый сплав ВК8	$\frac{10}{7850}$	$\frac{25}{7500}$	300 мкФ, воздух, в структуре слоя светлые, не травящиеся участки ($H_{\mu} = 6700, 7500, 8000$ МПа) и поля с коричневым оттенком ($H_{\mu} \leq 7000$ МПа). Присутствуют включения с $H_{\mu} \approx 15000$
Твердый сплав Т15К6	$\frac{10}{8000}$	$\frac{25}{6000}$	300 мкФ, воздух, участки типа эвтектики $H_{\mu} = 6000-6700$ МПа. Присутствуют включения с $H_{\mu} \approx 15000$
Графит ЭГ - 4	$\frac{15}{9000}$	$\frac{20}{12000}$	20 мкФ, воздух, слой равномерный, сплошность высокая

анализ показывает, что при ЭЭЛ стали Р6М5 твердым сплавом в слое содержится большее количество остаточного аустенита, чем в основном металле при легировании углеродом (графитом). Отмечающееся повышение стойкости инструмента, несмотря на пониженную твердость слоя, происходит, вероятно, в силу влияния перенесенного некоторого количества элементов анода и их отложения в поверхностной пленке, толщина которой соизмерима с толщиной атомных слоев.

Для получения сопоставимых данных по стойкости инструмента после упрочнения проводились производственные испытания. На копировально-фрезерном станке 6А445 испытывались шестизубые концевые фрезы Ø 36 мм из материала Р6М5 при черновом фрезеровании пазов в дисках (материал 07Х16Н6, скорость резания $V = 90$ об/мин, подача $S = 31,5$ м/мин, глубина фрезерования $t = 30$ мм).

Фреза в процессе работы охлаждалась эмульсией. Твердость HRC режущей части фрезы составляет 62. Стойкость неупрочненной фрезы составляла 360 мин, что соответствует изготовлению 0,5 детали.

ЭЭЛ подвергались задние поверхности зубьев по торцу (ширина полоски упрочнения 2-3 мм) и задние поверхности зубьев цилиндрической части фрезы (ширина упрочнения 3 – 4 мм). Упрочняющим материалом служили твердые сплавы ВК8, Т15К6, хром и графит марки ЭГ-4.

С целью получения более плотных и менее шероховатых покрытий процесс поверхностного легирования твердым сплавом и хромом проводили в два этапа. Сначала использовали более жесткий режим ($J_{к.з}=2,1$ А; $U_{х.х}=68,7$ В; ёмкость накопительного конденсатора $C=300$ мкФ), что позволило внедрить в обрабатываемую поверхность большое количество упрочняющего материала. Однако шероховатость в этом случае была неприемлемо высокой, $Ra = 6,3$ мкм. На втором этапе применяли более мягкий режим ($J_{к.з}=0,4-0,5$ А; $U_{х.х}=48,2$ В; $C = 20$ мкФ), при котором сглаживались наиболее выступающие вершины нанесенного на первом этапе покрытия и увеличилась его сплошность. Шероховатость Ra «выглаженной» поверхности составила 1,6 мкм.

ЭЭЛ графитовым электродом марки ЭГ-4 проводилось при $J_{к.з} = 1,4$ А; $U_{х.х} = 48,2$ В; $C = 300$ мкФ.

Критерием затупления зубьев фрезы были нарушение режущей кромки зубьев и полная потеря работоспособности фрезы.

Результаты показали, что лучшей износостойко-

стью при обработке стали 07Х16Н6 обладают фрезы, упрочненные углеродом (графитовым электродом). При этом стойкость фрез составила 780-800 мин (табл. 4).

Выводы:

1. В результате проведенных исследований установлено, что для обеспечения качественного покрытия рациональное время легирования должно быть несколько меньшим или равным времени достижения максимального привеса на катоде.

2. С увеличением длительности ЭЭЛ на одном режиме возрастает количество перенесенного материала с анода на катод, увеличиваются сплошность и толщина покрытия, а показатель шероховатости не изменяется.

3. Наиболее рациональным режимом для большинства использованных твердых износостойких материалов является режим, когда мощности разряда $N_p = 144,3$ Вт, обеспечивающий в сочетании с большой толщиной белого слоя (25-30 мкм) относительно высокую микротвёрдость, как белого слоя ($H_{\mu} = 7500-12000$ МПа), так и ЗТВ ($H_{\mu} = 400-5500$ МПа).

4. В качестве наиболее предпочтительных материалов электрода при ЭЭЛ можно рекомендовать: графит, хром, молибден и твёрдые сплавы ВК8 и Т15К6, обеспечивающие наиболее стабильные результаты на всех режимах легирования по массопереносу и сравнительно низкую шероховатость поверхности.

Литература:

1. Вопросы оптимального резания металлов. Под ред. А.Д. Макарова // Труды УАИ. Вып. 19, 29, 34, 54, 77. Уфа, 1971-1974.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора машиностроителя. Том 2.- М.: Машиностроение, 1980.- 559 с.
3. Некрасов С. С., Зильберман Г. М. Технология материалов. Обработка конструкционных материалов резанием. М.: Машиностроение, 1974.- 288 с.
4. Аршинов В. А., Алексеев Г. А. Резание металлов и режущий инструмент.- М.: Машиностроение, 1976.- 440 с.
5. Верецака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986.- 190 с.
6. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979.- 160 с.
7. Старков В. К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1984.- 119 с.
8. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве.- М.: Машиностроение, 1989.- 295 с.
9. Семенов А. П. Трение и адгезионное взаимодействие тупоугольных металлов при высоких температурах. М.: Наука, 1972.- 160 с.
10. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976.- 277 с.
11. Трент Е. М. Резание металлов. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1980.- 264 с.
12. Безпрозванных Л. В., Михайлов В. В., Соколов Ю. Д. Износостойкость стали 07Х16Н6 с электроискровыми покрытиями в безокислительных газообразных средах // Электронная обработка материалов.- 1985.- № 2.- С. 17-19.
13. Коробов Ю. М., Преис Г. А. Электромеханический износ при трении и резании металлов.- К.: Техника, 1978.- 200 с.
14. Тарельник В.Б., Кучмий А.Н. Электроэрозийное упрочнение металлорежущего инструмента для обработки коррозионно-стойких сталей // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1997.- № 1.- С. 70-71.

Таблица 4. Стойкость концевых фрез из быстрорежущей стали Р6М5, упрочненных методом ЭЭЛ, при обработке деталей из стали 07Х16Н6

Материал электрода	Стойкость инструмента, мин	Коэффициент увеличения стойкости, раз
Без упрочнения	360	1,0
Хром	430	1,19
Хром	470	1,30
Хром	430	1,19
ВК8	510	1,41
ВК8	510	1,41
ВК8	540	1,50
Т15К6	540	1,50
Т15К6	540	1,50
Т15К6	612	1,70
ЭГ-4	790	2,19
ЭГ-4	800	2,22
ЭГ-4	780	2,16



АО "НІРАО ВНІИКомпрессормаш"

головной институт по компрессоростроению в Украине

УКРАИНА, 40020, г. Сумы, пр. Курский, 6

тел.:+38 /0542/ 674-156

факс:+38 /0542/ 674-179

e-mail:info@nicmas.com

http: www.nicmas.com

ЭФФЕКТИВНАЯ КОМПРЕССОРНАЯ
ТЕХНИКА ДЛЯ ВСЕХ ОТРАСЛЕЙ
НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА.

ТЕПЛООБМЕННАЯ АППАРАТУРА.

ЗАПОРНО-РЕГУЛИРУЮЩАЯ АРМАТУРА
ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ.

РЕМОНТ РОТОРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
УСТАНОВОК.

СЕКРЕТ НАШЕГО УСПЕХА -

в прогрессивных наукоёмких технологиях

проектирование, производство, монтаж,
гарантийное и сервисное обслуживание

BUREAU VERITAS
Certification



ISO 9001
ISO 14001

