

УПРОЧНЕНИЕ И УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДОМ: КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

*Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта
и эксплуатации машинно-тракторного парка РАСХН,
1-й Институтский проезд, д. 1, г. Москва, 109428, Россия, tehnoinvest-vip@mail.ru*

Среди многих методов упрочнения и увеличения ресурса инструментов и деталей определенное место занимает электроискровое легирование (ЭИЛ). К настоящему времени накоплен значительный опыт его применения, который используется многими предприятиями [1–4 и др.].

Однако использование этого экономичного метода бывает порой недостаточно эффективным, ограничены объемы его применения. Это связано с отсутствием знаний об основных причинах ограниченного ресурса инструментов и деталей, факторах, способствующих увеличению износостойкости, непониманием особенностей электроискрового процесса. Кроме того, нет достаточного практического опыта работы на установках ЭИЛ. Также для успешного использования электроискрового метода упрочнения нет необходимой технологической документации по его применению. При высокой универсальности электроискрового метода нанесения металлопокрытий для создания эффективных упрочняющих технологий требуется система, позволяющая упростить методологию их разработки.

Цель данной работы – классификация объектов упрочнения и восстановления электроискровым методом и выявление для каждой группы объектов методологических и технологических особенностей электроискровой обработки с учетом разрушающего действия на рабочие поверхности основных внешних факторов и преобладающих видов износа. Работа направлена на создание системы, позволяющей упростить методологию разработки упрочняющей и восстанавливающей технологии в пределах технологических возможностей электроискрового метода.

Работоспособность и ресурс инструментов и деталей зависят от многих факторов, в частности от качественных характеристик этих объектов и условий их эксплуатации. Условно их можно разделить на факторы внешнего воздействия и внутренние. К последним отнесем качественные характеристики инструментов и деталей. Они определяются главным образом как прочностными свойствами материала, из которого они изготовлены, так и прочностными свойствами поверхностного слоя, а также параметрами рельефа рабочей поверхности.

Износ и потеря работоспособности инструментов и деталей разного назначения часто связаны с изменениями в поверхностном слое, происходящими в процессе их эксплуатации. В табл. 1 приведены результаты анализа преобладающих видов износа различных объектов с учетом разрушающего действия на рабочие поверхности основных внешних факторов.

Как следует из табл. 1, приведенный широкий типовой ряд инструментов и деталей, подлежащих упрочнению и восстановлению электроискровым способом, работает в условиях, которые различаются в широких пределах по силовому и тепловому воздействию на рабочие поверхности, наличию на контакте твердых элементов, агрессивных сред и проч. Эти условия определяют характерные виды изнашивания поверхностей: абразивный, адгезионный, усталостный, коррозионный, эрозионный и др.

Основой успешного универсального применения ЭИЛ (табл. 1) является возможность варьирования электрическими режимами, электродными материалами, длительностью обработки, составом межэлектродной среды. В результате обеспечивается управление в широких пределах эксплуатационными свойствами формируемых покрытий, их толщиной в пределах от нескольких микрометров до 1 мм и более, а также возможность создания нового рельефа поверхности повышенной несущей способности.

Ниже на базе теоретического анализа и практического опыта (с учетом данных табл. 1) предлагаются основные принципы увеличения износостойкости и ресурса разных объектов, которые приняты авторами в качестве методологической основы электроискровой упрочняющей обработки.

Приведенная классификация объектов применения ЭИЛ создана с учетом широких технологических возможностей этого метода и специфических условий эксплуатации рабочих поверхностей различных металлических изделий – инструментов и деталей (табл. 2).

Таблица 1. Условия эксплуатации и характер износа различных инструментов и деталей

№ п/п	Тип инструмента, детали	Условия эксплуатации	Вид и преобладающий характер износа
1	2	3	4
Инструменты и технологическая оснастка			
1	Металлорежущие инструменты из инструментальных сталей	Трение в контакте с материалом заготовки при высоких локальных давлениях и температурах на режущей кромке и в прикромочной зоне, локальный контакт с ювенильной поверхностью материала заготовки	Затупление (механический износ) режущей кромки, абразивный, адгезионный и тепловой износ рабочих поверхностей
2	Разделительные штампы листовой штамповки из инструментальных сталей		Затупление (механический износ) режущей кромки, абразивный, адгезионный, усталостный и фреттинг-износ рабочих поверхностей
1	2	3	4
3	Формообразующие штампы горячей штамповки	Трение в контакте с разогретым до пластического состояния металлом заготовки и окалиной	Изменение формы и размеров деформирующих элементов (механический, усталостный и тепловой износ), трещинообразование
4	Валки станов горячей прокатки		
5	Валки станов холодной прокатки	Трение в контакте с материалом заготовки при высоких локальных давлениях	Изменение формы и размеров деформирующих элементов, механический, усталостный и абразивный износ рабочих поверхностей
6	Литейные формы	Контакт с расплавом материала отливки	Изменение формы и размеров элементов литформы, тепловой износ и трещинообразование
7	Формы холодного прессования	Трение в контакте с сыпучим металлическим порошком	Изменение формы и размеров элементов рабочих частей, абразивный и усталостный износ
8	Формы горячего прессования	Трение в контакте с сыпучим материалом заготовки при повышенных температурах	Изменение формы и размеров элементов рабочих частей, абразивный, адгезионный или водородный, тепловой и усталостный износ
9	Инструменты для захвата и фиксирования деталей	Трение в условиях преимущественно упругого контакта с различными материалами	Изменение формы и размеров элементов инструмента, абразивный и механический износ
10	Слесарно-монтажные инструменты	Трение в контакте с материалом заготовки при повышенных давлениях	

Детали машин			
11	Различные детали, поверхности которых работают в условиях неподвижных соединений: а) наружные поверхности (вал, ось) б) внутренние поверхности (корпус)	Многоцикловое воздействие малых и средних давлений при микроперемещениях в контакте с другими деталями	Изменение размеров рабочей поверхности, механический, усталостный и фреттинг-износ. Результат: снижение плотности контакта по периметру соединения с сопряженной деталью
12	Различные детали, поверхности которых работают в условиях трения скольжения: а) без смазки (сухое)	Трение скольжения при малых и средних локальных давлениях в контакте с другими деталями	Истирание и увеличение зазора с сопряженной деталью вследствие износа: – механического, адгезионного, абразивного, усталостного
	б) со смазкой		– водородного
13	Различные детали, поверхности которых работают в условиях контакта: а) с потоком газа;	Контакт при нормальной или повышенной температуре: – с потоком газа при наличии капель жидкости и твердых включений	Изменение формы и размеров отдельных рабочих элементов вследствие износа: – эрозионного; коррозионного; абразивного
	б) с жидкостью	– с различными жидкостями	– коррозионного (в т.ч. водородного), эрозионного; кавитационного
	в) с твердой средой	– с сыпучими и несипучими материалами	– абразивного

Таблица 2. Классификация объектов и основные принципы увеличения износостойкости и ресурса при использовании электроискровой обработки

Условный № классов объектов	Основные объекты и их поверхности	Преобладающие факторы, инициирующие износ	Основные принципы увеличения износостойкости
1	2	3	4
I – Поверхности, контактирующие с металлами			
I	Поверхности скольжения пар трения различных механизмов и агрегатов (малонагруженные, $p < 0,2\sigma_s$)	Локальное силовое нагружение	Увеличение несущей способности поверхности
		Адгезионное взаимодействие материалов пары трения	Создание пары трения с рабочими поверхностями из химических элементов и соединений с минимальной взаимной склонностью к свариванию (схватыванию)
		Наличие между контактирующими поверхностями твердых элементов	Увеличение твердости поверхности
		Наличие на поверхности контакта химически активных веществ	Создание пары трения с рабочими поверхностями из химических элементов и соединений, пассивных по отношению к веществам, находящимся на контакте
		Знакопеременное силовое нагружение	Создание в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия

II	Поверхности неподвижных соединений (посадочные поверхности под подшипники качения и т.п.) валов, осей и корпусных деталей (средненагруженные, $0,2\sigma_s < p < 0,5\sigma_s$)	Силовое нагружение	Увеличение несущей способности поверхности
		Циклические микроперемещения	– Нанесение на рабочую поверхность слоя смазки или мягкого покрытия – Создание в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия
		Наличие между контактирующими поверхностями твердых элементов	Увеличение твердости поверхности
III	Рабочие поверхности инструментов для обработки металлов и сплавов <u>резанием</u> (черновой и точной размерной обработки) и <u>давлением</u> (холодной и горячей прокатки и штамповки, прессования, волочения) (высоконагруженные, $p > \sigma_s$)	Силовое нагружение	Увеличение твердости поверхности и оптимизация ее рельефа
		Тепловое нагружение	Создание на рабочей поверхности слоя с теплопроводностью, существенно отличающейся от материала заготовки
		Относительное перемещение заготовки и инструмента	Оптимизация рельефа рабочей поверхности
		Адгезионное взаимодействие материалов заготовки и инструмента	Создание на рабочей поверхности слоя из химических элементов и соединений с минимальной склонностью к свариванию с материалом заготовки
		Наличие между контактирующими поверхностями твердых элементов	Увеличение твердости поверхности
IV	Поверхности контакта с расплавленным металлом литейной оснастки (теплонагруженные)	Тепловое нагружение	Создание на рабочей поверхности теплоизолирующего слоя из химических элементов и соединений с минимальной склонностью к свариванию с расплавом
		Химическое взаимодействие с расплавом металла	
II – Поверхности, контактирующие с неметаллическими материалами			
V	Рабочие поверхности деталей и инструментов, контактирующие с абразивной средой	Силовое нагружение	Увеличение твердости поверхности
		Относительное перемещение абразивной массы и рабочей поверхности детали или инструмента	
VI	Рабочие поверхности деталей и инструментов, контактирующие с неметаллическими материалами (трение, резание, давление)	Силовое нагружение	Увеличение твердости поверхности
		Наличие между контактирующими поверхностями твердых элементов	
		Тепловое нагружение	Создание на рабочих поверхностях слоя с теплоизолирующими свойствами
		Наличие на поверхности контакта химически активных веществ	Создание на рабочих поверхностях коррозионностойкого слоя

<i>III – Поверхности, контактирующие с жидкостями и газами</i>			
VII	Рабочие поверхности деталей, контактирующие с жидкостями, в т.ч. агрессивными	Кавитационное действие	Увеличение твердости поверхности
		Воздействие химически активными веществами	Создание на рабочих поверхностях коррозионностойкого слоя
VIII	Рабочие поверхности деталей, контактирующих с потоками газов, в т.ч. при высокой температуре	Эрозионное действие влаги	Увеличение твердости поверхности
		Тепловое нагружение	Создание на рабочей поверхности защитного слоя с теплоизолирующими свойствами
		Абразивное действие твердых элементов	Увеличение твердости поверхности

Согласно приведенной таблице, весь массив объектов, износостойкость и общий ресурс которых можно эффективно увеличить путем электроискровой обработки, условно разделен на три группы, то есть объекты, рабочие поверхности которых находятся в контакте 1) с металлами, 2) с неметаллическими материалами и 3) с жидкостями или газами. Указанные группы объединяют 8 классов объектов, различающихся условиями эксплуатации. Проанализируем для каждого класса объектов основные принципы увеличения износостойкости и ресурса, которые могут представлять собой основу для разработки электроискровых технологий.

I класс объектов. К этому классу отнесем детали с рабочими поверхностями, определяющими их ресурс, в силовом отношении условно названные малонагруженными ($p < 0,2\sigma_s$, где p – давление, σ_s – предел текучести). К ним отнесем преимущественно поверхности скольжения пар трения различных механизмов и агрегатов.

В процессе эксплуатации пар трения скольжения на контакте на локальных участках могут возникать давления, значительно превосходящие по значению среднее нагружение и вызывающие износ контактирующих поверхностей. Это связано с несколькими причинами: неоптимальной шероховатостью поверхностей; вибрацией; разрывом масляной пленки и др. Противодействовать этому рекомендуется увеличением несущей способности поверхности за счет увеличения ее твердости и суммарной площади контактирующих участков пары трения.

На некотором этапе в процессе трения в условиях отсутствия или ограниченной смазки становятся заметными результаты адгезионного взаимодействия материалов пары трения, ведущие к схватыванию поверхностей, разрыву «мостиков схватывания» и износу поверхностей. Причинами адгезионного взаимодействия материалов могут служить разрыв окисных пленок на поверхности трения, химическое сродство контактирующих материалов, диффузионные процессы на контакте. Эффективный и проверенный прием снижения адгезионных процессов – создание пары трения с рабочими поверхностями из химических элементов и соединений с минимальной взаимной склонностью к свариванию.

Наличие на контакте пары трения твердых элементов (продуктов износа или твердых включений в смазке) также способствует разрушению трущихся поверхностей. Увеличением твердости рабочих поверхностей снижают износ трущейся пары.

Еще одним фактором, инициирующим износ трущихся поверхностей, является наличие на поверхности контакта химически активных веществ, включающих кислород, водород и другие химические элементы, реагирующие с элементами материалов пары трения и их разрушающие (окислительное, водородное изнашивание и проч.). Препятствует этому создание рабочих поверхностей пары трения из химических элементов и соединений, пассивных по отношению к веществам, находящимся на контакте.

Многие пары трения работают в условиях вращения, когда поверхности испытывают знакопеременное силовое нагружение. Это ведет к появлению и росту в поверхностном слое детали типа «вал», «ось» растягивающих напряжений, накоплению дефектов и возникновению трещин, что в итоге может привести к разрушению вала. Создание в поверхностном слое остаточных напряжений сжа-

тия известными методами поверхностно-пластической деформации препятствует появлению и развитию трещин.

II класс объектов. Сюда отнесем детали с рабочими поверхностями, условно названные средненагруженными. Нагрузка на них выше, чем у основной массы пар трения скольжения, но ниже, чем у инструментов для обработки металлов резанием или давлением и обычно не превышает значения $0,5 \sigma_s$. Это поверхности неподвижных соединений - посадочные поверхности под подшипники качения и т.п. – деталей типа «вал», «ось» (наружные) и типа «корпус» (внутренние).

Такие поверхности при эксплуатации подвержены силовому нагружению ответной деталью, ее циклическим микроперемещениям, на поверхности контакта могут присутствовать твердые элементы (к примеру, продукты эрозии).

Действие силового нагружения компенсируется увеличением несущей способности поверхности за счет повышения ее суммарной площади контактирующих участков деталей и твердости. Последнее препятствует также разрушающему действию твердых элементов, присутствующих на контакте. Разрушению поверхности из-за циклического микроперемещения обратной детали, вызывающего фреттинг, препятствует наличие на поверхности контакта смазки, мягкого покрытия (медь, свинец, олово и проч.) или создание на рабочей поверхности детали остаточных напряжений сжатия.

III класс объектов. Этот класс объединяет наиболее нагруженные в силовом отношении объекты – инструменты для обработки металлов и сплавов резанием (черновой и точноразмерной обработки) и давлением (холодной и горячей прокатки и штамповки, прессования, волочения), названные условно высоконагруженными ($p > \sigma_s$). Нагрузка на контакте рабочей поверхности с заготовкой обычно существенно превышает предел текучести материала заготовки.

Ограниченные по площади участки рабочих поверхностей этих объектов подвергаются воздействию комплекса разрушающих факторов, в т.ч. силовому и тепловому нагружению; имеется относительное перемещение заготовки и инструмента; происходят процессы адгезионного взаимодействия материалов заготовки и инструмента; на поверхности контакта могут присутствовать твердые элементы.

Высокому силовому нагружению рекомендуется противодействовать увеличением твердости поверхности и оптимизацией ее рельефа. Последняя связана с заменой рельефа из совокупности протяженных выступов на рельеф, из совокупности выступов ограниченной длины [5]. Такой рельеф особенно эффективен при относительном перемещении материалов инструмента и заготовки в условиях пластического состояния последней. Увеличение твердости рабочей поверхности инструмента препятствует также разрушающему действию твердых элементов, присутствующих на контакте.

Для защиты от теплового воздействия на рабочей поверхности инструмента создают слой с теплопроводностью, существенно отличающейся от материала заготовки [5]. Если теплопроводность материала заготовки низкая, на поверхность инструмента наносится покрытие с высокой теплопроводностью (например, меди); это позволяет рассредоточить тепло по поверхности контакта. Если же теплопроводность материала заготовки относительно высокая по отношению к материалу инструмента, то рекомендуется покрытию придать свойства теплоизолятора (к примеру, обработка твердым сплавом, графитом); в этом случае тепло будет отводиться в материал заготовки.

Противодействие адгезионному взаимодействию материалов заготовки и инструмента осуществляется, как и для менее нагруженных объектов, созданием на рабочей поверхности инструмента слоя из химических элементов и соединений с минимальной склонностью к свариванию с материалом заготовки.

IV класс объектов. В указанный класс включены теплонагруженные объекты (литейная оснастка), рабочие поверхности которых в процессе эксплуатации подвергаются длительному воздействию очень высоких температур расплавленных металлов – чугуна, меди, никеля, титана и проч. В этих условиях происходит обеднение легирующими элементами поверхностного слоя изложницы (или литейной формы), утрата вследствие этого рабочей поверхностью защитных свойств, повышенное химическое взаимодействие материалов литейной оснастки и расплава и разрушение отдельных участков ее рабочей поверхности при отделении отливки.

Увеличение ресурса таких объектов достигается за счет создания на рабочей поверхности жаростойкого слоя из химических элементов и соединений с минимальной склонностью к схватыванию и свариванию с расплавом на поверхности катода.

V класс объектов. Он объединяет различные детали и инструменты, рабочие поверхности которых изнашиваются вследствие воздействия на них абразивной среды. Это инструменты толщиной до 8–10 мм почвообрабатывающих органов (лапы культиваторов, диски сошников и др.), пластины бетономешалок, штрипсы для резки камня, детали (конуса, ниппели и др.) бурильного оборудо-

дования, детали пресс-форм для производства строительных элементов (кирпича, блоков), абразивных кругов и проч.

Эффективным средством увеличения износостойкости таких объектов является создание поверхностного слоя повышенной твердости.

VI класс объектов. Это детали и инструменты, в т.ч. технологическая оснастка, рабочие поверхности которых находятся в контакте с неметаллическими материалами растительного (древесина, бумага, стебли растений, овощи и фрукты), животного (мясо, кожа, шерсть), а также искусственного происхождения (резина, пластмассы). В зависимости от функций, которые выполняют объекты этого класса (трение, резание, давление), и условий эксплуатации рабочие поверхности их подвержены воздействию одного или нескольких основных следующих факторов, вызывающих износ: 1) силовое нагружение, 2) тепловое нагружение, 3) наличие на поверхности контакта химически активных веществ, 4) наличие на поверхности контакта твердых элементов.

Подобно объектам приведенных выше классов, но с определенными технологическими особенностями противодействие этим разрушающим факторам осуществляется следующими путями: 1-й и 4-й факторы – увеличением твердости поверхности; 2-й – созданием на рабочих поверхностях слоя с теплоизолирующими свойствами; 3-й фактор – созданием на рабочих поверхностях слоя из химических элементов и соединений, пассивных по отношению к веществам, находящимся в контакте.

VII класс объектов. Это изделия разного назначения (лопасти гидротурбин, гребные винты, детали водяных насосов, запорной аппаратуры, трубопроводов и проч.), поверхности которых контактируют с жидкостями, обладающими агрессивными свойствами по отношению к материалам этих изделий. На ответственных поверхностях таких деталей протекают процессы коррозии, при трении о металл жидкости происходит эрозия элементов поверхности. Кроме того, поверхности подвергаются абразивному изнашиванию твердыми частицами, имеющимися в жидкой среде, а также кавитации (гидравлическим ударам).

Противодействие этим факторам эффективно созданием на рабочих поверхностях коррозионно-, эрозиянностойкого слоя и увеличением твердости поверхности.

VIII класс объектов. К данному классу отнесем различные детали, которые подвержены при нормальной и высокой температурах воздействию потоков газов, обладающих агрессивными свойствами по отношению к материалам этих деталей, – турбинные лопатки, лопасти вентиляторов дымососов и проч.). Кроме указанных разрушающих факторов, на рабочие поверхности воздействуют также капли жидкости и твердые элементы в виде пыли, присутствующие часто в газовом потоке. В результате происходит эрозионное, коррозионное и абразивное разрушение элементов детали.

Увеличение износостойкости и ресурса таких объектов достигается путем создания на рабочих поверхностях защитного коррозионностойкого слоя повышенной твердости и жаростойкости, обладающего теплоизолирующими свойствами.

Обратим внимание, что электроискровые покрытия эффективны, как правило, при максимальном износе рабочих поверхностей объектов, когда они утрачивают работоспособность (табл. 2), не превышающем 1,0 мм. Эффективность электроискровой обработки резко снижается при обработке объектов с допустимым износом значительно большего значения.

Проанализируем технологические особенности электроискровой обработки объектов приведенной классификации. Принципиальное различие в технологии обработки заключается в выборе материала электрода, энергетического режима формирования покрытия (энергия искровых импульсов), удельной продолжительности электроискровой обработки и в последующей обработке поверхности (табл. 3).

Применительно к объектам из сталей и сплавов на основе железа выбраны из всего многообразия токопроводящих материалов легированные и инструментальные стали (65Г, ШХ15, Р6М5 и др.), твердые сплавы типа ТК, ТТК, ВК, СТИМ, графиты, ферросплавы, жаростойкие сплавы, чистые металлы Al, Ni, Cr, Mo, Cu и др., которые успешно используются при упрочняющей обработке поверхностей и восстановлении размеров изношенных деталей. Их выбор основан на возможности получения достаточно качественных покрытий с хорошими эксплуатационными характеристиками, доступности этих материалов. На практике правильным подбором электродных материалов и их композиций удается не только улучшить эксплуатационные свойства поверхности, но и обеспечить более благоприятные условия ее работы в контакте с другой деталью.

Как следует из табл. 3, широкая область применения ЭИЛ обеспечивается электрическими режимами с энергией импульсов от 0,05 до 10 Дж. Указанный диапазон режимов позволяет по обычной технологии наносить покрытия толщиной до 1–1,5 мм (по наиболее выступающим частям). Вид-

но, что решение разных задач с помощью электроискровых покрытий требует применения своего диапазона режимов.

Таблица 3. Технологические особенности электроискровой обработки различных объектов из сталей и сплавов на основе железа

Условный № классов объектов (согл. табл.2)	Рациональные материалы электродов	Энергия импульсов, Дж	Удельное время обработки, мин/см ²	Толщина нанесенного слоя покрытия, мкм	Последующая обработка (варианты)
I – Поверхности, контактирующие с металлами					
I – мало-нагруженные ($p < 0,2\sigma_s$)	<i>Наружные поверхности вращения стальных деталей – упрочнение новых (У)</i>				
	Твердые сплавы + Cu (Pb, Sn), графиты **, легированные и инструментальные стали (65Г, ШХ15, Р6М5 и др.), Мо, Cr *	0,1–0,4	0,8–2,0	30–100	ППД (алмазное выглаживание, обкатка роликом или шариком); шлифовка; доводка притиром
	<i>То же – восстановление изношенных поверхностей (В)</i>				
	Твердые сплавы + Cu (Pb, Sn), легированные и инструментальные стали (65Г, ШХ15, Р6М5 и др.), Cr, FeCr *	0,1–1,2	0,5–2,0	30–200	ППД (или шлифовка) + доводка притиранием по сопряженной детали
	<i>Внутренние поверхности вращения стальных и чугуновых деталей - У</i>				
	Графиты, Мо, Cr, Cu, твердые сплавы + Cu (Pb, Sn), FeCr *	0,1–0,4	0,8–2,0	20–80	ППД (раскатка или дорнование); развертывание; хонингование
<i>То же – В</i>					
II – средне-нагруженные ($0,2\sigma_s < p < 0,5\sigma_s$)	Cr, FeCr, твердые сплавы или легированные и инструментальные стали + Cu (Pb, Sn) *	0,3–1,2	0,5–1,5	20–150	ППД (развертывание или хонингование) + доводка притиранием по сопряженной детали
	<i>Наружные поверхности вращения стальных деталей – В</i>				
	Легированные и инструментальные стали (65Г, ШХ15, Р6М5 и др.) или твердые сплавы + Cu	0,1–2,5	0,4–2,0	30–300	Без обработки; ППД; шлифование
<i>Внутренние поверхности вращения стальных и чугуновых деталей - В</i>					
III – высоко-нагруженные ($p \gg 0,5\sigma_s$)	Си, твердые сплавы или чугуны + Cu	0,1–2,5	0,4–2,0	30–250	Без обработки; калибрование
	<i>Металлообработка: чистовое резание, тонколистовая штамповка, холодное прессование – У</i>				
III – высоко-нагруженные ($p \gg 0,5\sigma_s$)	Графиты, твердые сплавы (типа ВК, ТК, ТТК,	0,05–0,2	1,7–3,0	10–30	Без обработки; доводка алмазным инструментом

	СТИМ), медь				
	<i>Металлообработка: черновое резание, толстолистовая штамповка, прокатка - У</i>				
	Графиты, твердые сплавы, в т.ч. + медь	0,3–1,5	0,5–1,5	50–150	Без обработки; обработка ЭИЛ на более мягком режиме
	<i>Металлообработка: горячая штамповка (облой) – У</i>				
	<i>Легкозаполняемые участки гравюры, в т.ч. облойный мостик</i>				
	Твердые сплавы	0,3–3,0	0,3–1,5	50–250	Без обработки
	<i>Труднозаполняемые участки гравюры</i>				
	Графиты	0,1–0,3	1,5–2,0	10–20	Без обработки
IV – теплонагруженные	<i>Металлообработка: литейная оснастка – У</i>				
	Жаростойкие сплавы на основе Si, Al, твердые сплавы	0,4–1,2	0,5–0,8	50–100	Без обработки
II – Поверхности, контактирующие с неметаллическими материалами					
V	<i>Поверхности, контактирующие с абразивной средой – У</i>				
	<i>а) безразмерная обработка</i>				
	Твердые сплавы	1,2–8,0	0,2–0,5	200–1000	Без обработки
	<i>б) точноразмерная обработка (пресс-формы)</i>				
	Твердые сплавы, графиты	0,4–1,2	0,5–0,8	50–200	Без обработки; обработка ЭИЛ на более мягком режиме
VI	<i>Поверхности, контактирующие с неметаллами растительного, животного и искусственного происхождения - У</i>				
	<i>а) трение скольжения</i>				
	Графиты; твердые сплавы + медь	0,05–0,4	0,8–3,0	10–50	ППД; абразивная доводка
	<i>б) обработка резанием</i>				
	Твердые сплавы, графиты	0,1–0,4	0,8–2,0	30–100	Без обработки
	<i>в) обработка давлением: пресс-формы для пластмасс, резины</i>				
	Твердые сплавы, графиты	0,1–0,4	0,8–2,0	30–100	Доводка алмазным инструментом
III – Поверхности, контактирующие с газами и жидкостями					
VII	<i>Поверхности деталей, находящиеся под воздействием агрессивных жидкостей - У</i>				
	Al, Ni, Cr, Mo, FeCr, FeV, сплав Т15К6	0,4–6,0	0,1–0,8	50–500	Без обработки
VIII	<i>Поверхности деталей, находящиеся под воздействием агрессивных газов, в т.ч. при повышенных температурах и наличии твердых частиц - У</i>				
	Сплавы типа ВЖЛ, твердые сплавы, стеллит	0,4–1,2	0,5–0,8	50–200	Без обработки

Условные обозначения: У – упрочнение; В – восстановление.

*При обработке поверхностей соединений трения скольжения и рабочих поверхностей инструментов металлообработки необходимо подбором электродных материалов обеспечить различие покрытий (поверхностных слоев) по химическому составу и физико-механическим свойствам относительно материала контртела.

*** При обработке графитом на мягких электрических режимах размер детали не изменяется.*

Примечание. Указанные значения технологических параметров и толщины нанесенного слоя покрытий реализованы при использовании установок типа «ЭФИ», «Элитрон», «БИГ», «Вестрон», «Алиер».

Указанное касается работы в ручном режиме одним электродом. Механизированная многоэлектродная обработка ЭИЛ требует применения более мощных электрических режимов.

Приведенные в табл. 3 значения удельного времени электроискровой обработки соответствуют отмеченным электрическим режимам. Для мягких режимов оно должно быть не менее 3 мин/см², для жестких – 0,1–0,2 мин/см².

Важным элементом технологии упрочняющей или восстанавливающей электроискровой обработки является последующее воздействие на обработанную поверхность. В ряде технологий (см. табл. 3) такая обработка не требуется. В то же время, когда предъявляются повышенные требования к обработанной поверхности в отношении точности размера, качества поверхности, напряженного состояния, выполняются по назначению различные виды дополнительной обработки: шлифование, доводка алмазным инструментом, поверхностно-пластическое деформирование (алмазное выглаживание, обкатка или раскатка, хонингование, притирка по сопряженной детали, вторичная обработка ЭИЛ на более мягком электрическом режиме или комбинация этих видов обработки). Обычно при этом удаляется 30–70% толщины нанесенного слоя. В результате высота микронеровностей контактных участков обработанной ЭИЛ поверхности снижается от исходной Rz16–320 до Ra1,25–6,3 мкм, контактная сплошность поверхности повышается в несколько раз.

В заключение отметим, что реализация указанных основных принципов увеличения износостойкости и ресурса эффективна при соразмерности толщины упрочняющих и защитных покрытий с величиной критического износа объектов электроискровой обработки; увеличение ресурса осуществляется также повторным нанесением таких покрытий, а также многослойных и комбинированных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов Г.П.* Технология электроискрового упрочнения инструмента и деталей машин. М.: Машгиз, 1961. 302 с.
2. *Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М.* Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
3. *Верхотуров А.Д., Муха И.М.* Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев: Техника, 1982. 182 с.
4. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) /МГУ им. Н.П.Огарева и др.; Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин, В.И. Иванов, С.А. Величко, П.А. Ионов. Саранск: тип. «Красный Октябрь», 2003. 504 с.
5. *Иванов В.И.* Повышение ресурса разделительных штампов путем упрочнения и восстановления их электроискровым способом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2000. 18 с.

Поступила 10.03.10

Summary

Based on analysis of operating conditions and the predominant wear a wide range of tools and components proposed a classification of hardened elektrois-blood by objects and describe methodological and technological features to processing to increase their wear resistance and lifetime.