

УДК 621.9.047

**А.И.БОЛДЫРЕВ****ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ  
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ  
ОБРАБОТКЕ**

*Рассмотрены вопросы формирования поверхностного слоя при электрохимической размерной и комбинированной обработке. Показано, что достигнуть требуемых эксплуатационных показателей поверхностей с заранее заданными свойствами возможно за счет оптимального сочетания технологических характеристик различных процессов при комбинированной обработке.*

**Ключевые слова:** долговечность деталей, электрохимическая размерная обработка, комбинированные методы обработки, технологические характеристики.

**Введение.** Повышение долговечности и надежности работы изделий – одна из важнейших научных и народнохозяйственных проблем. Повышение ресурса изделий позволяет с минимальными затратами увеличить их выпуск с имеющихся производственных площадей. Для решения этой проблемы в современном машиностроении совершенствуются конструкции деталей и узлов машин, создаются новые конструкционные материалы, разрабатываются различные процессы изготовления заготовок и их обработки.

В настоящее время технологические методы являются наиболее эффективными в решении этой проблемы. Повысить ресурс и надежность работы деталей, узлов и машин возможно за счет технологического обеспечения для заданных условий эксплуатации оптимальных значений параметров поверхностного слоя [1]. В этой области достигнуты значительные результаты по исследованию основных технологических схем обработки, а также по созданию способов и устройств для их реализации.

Одними из перспективных методов повышения устойчивости физико-механического состояния поверхностного слоя являются электрохимическая размерная и комбинированная обработки.

**Формирование поверхностного слоя при электрохимической размерной обработке (ЭХРО).** ЭХРО характеризуется отсутствием механического контакта между электродом-инструментом и заготовкой. Вследствие этого микропогрешности рабочей поверхности инструмента не копируются на заготовке.

На рис.1 показана схема формообразования углубления на аноде. На катоде имеется выступ А, высота которого соизмерима с размерами межэлектродного зазора  $h_2$ . Если высота выступа А на 1-2 порядка меньше зазора, то углубления на детали практически не будет. При высоте неровности А более 0,1 зазора она с инструмента копируется на деталь, причем тем точнее, чем меньше соотношение размера А и зазора. Такие выступы на детали независимо от размеров относятся к макронеровностям.

Они формируются при соотношении  $\frac{(h_1 - h_2)}{h_2} \geq 0,1$ . Для межэлектродных зазоров, обычно используемых на станках (0,15-0,3 мм), шерохо-

ватость рабочего профиля инструмента в 5-10 раз ниже граничного значения и не может копироваться на детали. Из условий обеспечения безвихревого движения потока электролита шероховатость инструмента должна быть не выше 1-2 мкм. Эксперименты и моделирование формирования поверхностей после ЭХРО показали, что уже в самом начале процесса практически полностью удаляются регулярные выступы предшествующей обработки и образуются неровности, которые в дальнейшем сохраняются независимо от снимаемого припуска.

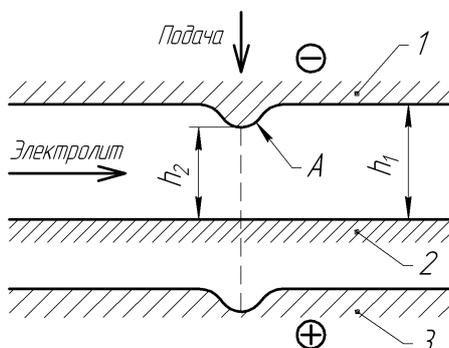


Рис.1. Формообразование углубления на аноде:  
1 – катод-инструмент; 2, 3 – поверхность анода  
при  $A < 0,1$  зазора и  $A > 0,1$  зазора соответственно

Известно также, что микрорастравливания на границах зерен наблюдаются только на материалах с крупнозернистой структурой. На формирование микрорастравливаний оказывают влияние свойства анодных пленок, которые могут создавать нетокопроводящие зоны на границах зерен, и тогда микроуглубления формируются в форме питтингов. Подобная картина наблюдалась учеными Тульского государственного университета на титановых сплавах при режимах обработки, не обеспечивающих удаление анодной пленки с поверхности электролизера.

В общем случае неровности на инструменте ниже их граничного значения из условия обеспечения гидродинамики, и поверхность можно считать плоской. После удаления определенного припуска с заготовки ее поверхность может быть представлена, как показано на рис.2, где индексом  $З$  обозначено зерно (соответственно  $З_1$ ;  $З_2$  и т.д.).

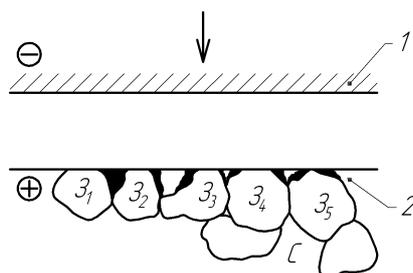


Рис.2. Поверхностный слой после ЭХРО:  
1 – катод-инструмент; 2 – анод-деталь

Из материаловедения известно, что электропроводность зерна на несколько порядков выше, чем связки. Если представить микроструктуру обрабатываемой поверхности в форме прямоугольников, приблизительно повторяющих зерно и связку, то напряженность поля  $\rho$  на зернах ( $Z_1, Z_2$  и т.д.) будет существенно выше, чем на связках ( $C_1; C_2$  и др.), (рис.3). На границе зерна и связки силовые линии поля конденсируются и возникает зона повышенной напряженности. Связка, в силу большего сопротивления, растворяется медленно, а на границе зерна и связки идет интенсивный сьем материала с зерна (рис.4). Видимо, в начальный момент формообразования микроуглубления, когда связка практически не растворилась со стороны «Б», на обрабатываемой поверхности имеются выступы (последние наблюдались учеными АН Молдовы на микрошлифах при значительных размерах связки). Для большинства сплавов ширина связки на несколько порядков меньше, чем зерна. Поэтому по мере съема материала с границ зерна открывается доступ к боковым поверхностям связки, которые начинают растворяться. Из-за малой толщины связки (обычно в пределах нескольких микрон) ее растворение происходит достаточно быстро, а остаток связки удаляется напором электролита. В силу сказанного после электрохимической обработки практически не наблюдаются выступы связки на поверхности. Образующиеся углубления характеризуют шероховатость и глубину растравленного слоя.

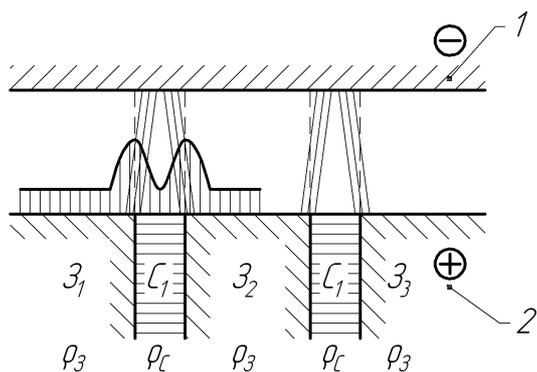


Рис.3. Модель микроструктуры поверхностного слоя: 1 – катод-инструмент; 2 – анод-деталь

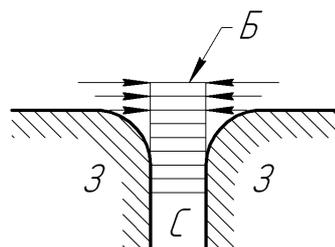


Рис.4. Съем материала на границе зерна и связки

Скругленная форма боковых поверхностей углублений, образующихся на границе зерна и связки, ограничивает возможности применения измерительных средств для контроля шероховатости. В частности, нельзя обеспечить достоверность контроля после ЭХРО при использовании эталонов, особенно если они выполнялись лезвийным или абразивным инструментом. До 2-5 раз может дать ошибку использование интерференционных методов и способов измерения световым лучом. Наиболее точную картину дает контактный метод измерения с помощью иглы (профилометры, про-

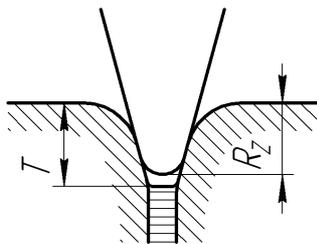


Рис. 5. Определение шероховатости и глубины растравленного слоя сканированием иглой

филографы). Игла, проникая в углубление на границе зерна и связки (рис.5), характеризует высоту неровностей.

Если рассмотреть углубление на поперечном шлифе, то выяснится, что игла, как правило, не достигает донной части углубления. Поэтому замеренное значение неровности будет зависеть от радиуса скругления вершины

иглы (обычно до 15-20 мкм), а расстояние до дна впадины определяет глубину микрорастворивания. Для одних и тех же материалов деталей соотношение высоты неровностей  $R_z$  и глубины микрораствориваний  $T$  после ЭХРО на рабочих режимах сохраняется практически постоянным ( $\frac{T}{R_z} = const$ ). Так, для жаропрочных сплавов это соотношение составляет 1,5-1,6 (прибор 203 завода «Калибр»). Разработана таблица, характеризующая соотношение  $K_1$  между шероховатостью и глубиной микроуглублений для различных сплавов. Положение зерен в сплаве относительно измерительной иглы носит случайный характер, поэтому результаты замеров имеют значительный разброс, учитываемый коэффициентом  $K_2$ . Для сплавов аустенитного класса с крупным зерном  $K_2 = 1,1$ ; титановых материалов  $K_2 = 1,2 - 1,25$ ; алюминиевых сплавов  $K_2 = 1,1 - 1,2$ . В мелкозернистых сталях сорбитной группы зерна растворяются целиком и под ними остаются углубления с пологим дном.

Точность применяемых измерительных средств не позволяет выявить разницу между высотой неровности и глубиной растравливания, поэтому считают, что такие сплавы не имеют микрораствориваний ( $K_1 \approx 1$ ,  $K_2 \approx 1$ ). Коэффициент пропорциональности между высотой неровностей и глубиной микрораствориваний оценивается как  $K = K_1 \cdot K_2$ . Замер шероховатости не представляет сложности, а с помощью коэффициента  $K$  удается, не прибегая к трудоемким исследованиям, установить глубину измененного слоя и назначить припуски  $z$  на финишные операции:

$$T = K \cdot R_a; \quad z \geq T.$$

Однако финишные операции целесообразно соединять с формообразующими, поэтому следует разработать технологический процесс, позволяющий устранить появление дефектного слоя. Из физики процесса ЭХРО известно, что с ростом плотности тока на аноде глубина микрораствориваний снижается. Достичь такого режима можно за счет уменьшения зазоров, увеличения напряжения, повышения электропроводности и других свойств среды, использования импульсного тока. Уменьшать зазор и увеличивать напряжение можно только до определенного предела, после чего процесс становится нестабильным. Для снижения глубины микрорастворив-

ливаний целесообразно применять импульсный ток с крутым падением его величины в импульсе. Проведенные в Тульском политехническом институте исследования таких режимов показали возможность снижения глубины микроуглублений до двух раз. Еще больший выигрыш в повышении качества поверхности дает импульсно-циклический метод, позволяющий реализовать высокий ток в импульсе и протекание процесса при малых межэлектродных зазорах.

Исследования, выполненные в Новочеркасском политехническом институте, показали, что избежать микроистравливания можно, вводя в электролит различные добавки, в том числе поверхностно-активные вещества. Механизм их воздействия можно объяснить концентрацией среды на границах зерен и равномерным распределением напряженности полей, обеспечивающих одинаковый съем со структурных составляющих материалов. Доказательством служит заметное снижение неровностей на поверхности после обработки в электролитах с поверхностно-активными веществами. Исследования, выполненные А.М. Сулимой [2], показали определяющее влияние на характеристики выносливости сплавов шероховатости поверхности. Применительно к ЭХРО, где имеются концентраторы напряжений в форме микроистравливания, неровности приходится рассматривать как часть микроуглублений, и предложенные в работах А.М. Сулимы формальные зависимости для расчета предела прочности материалов при многоцикловых нагружениях становятся справедливыми только для сплавов с мелким зерном. Для жаропрочных и титановых сплавов необходимо учитывать местную концентрацию напряжений за счет микроуглублений, имеющих в донной части малые радиусы скруглений (в пределах нескольких микрон).

Высоконагруженные детали после ЭХРО полируют, удаляя при этом 0,01-0,05 мм материала. Усталостные испытания, выполненные на машинах МУИ-6000, показали, что после удаления слоя, соизмеримого с глубиной микроистравливания, для всех сплавов предел прочности полностью восстанавливается, а за счет наклепа поверхности при полировании этот показатель может даже превысить исходное значение. Величина припуска под операцию зависит от шероховатости (и от связанного с ней микроистравливания), поэтому для сплавов с мелкозернистой структурой припуск не превышает 10 мкм, а для титанового сплава ВТ8 с глубиной истравливания до 30 мкм съем должен быть около 40 мкм. Дальнейшее удаление припуска не дает повышения прочности.

Механическое полирование достаточно трудоемкая и, как правило, ручная операция, поэтому ее пытаются заменить электрохимической полировкой, виброударной обработкой, галтовкой. Проведенные исследования (рис.6) дают основания рекомендовать в качестве последующей за ЭХРО операцией упрочняющую технологию. Так, после виброударной обработки все сплавы имеют повышенную усталостную прочность. При этом шероховатость большинства сплавов не снижается (для сталей с мелкозернистой структурой может наблюдаться повышение неровностей по сравнению с состоянием поверхности после ЭХРО), а степень наклепа достигает уровня, близкого к получаемому после механической обработки. Исключение составляют титановые сплавы, для которых поверхностный наклеп не всегда достаточен для восстановления предела прочности до исходного, и здесь механическое снятие припуска остается предпочтительным. Эффективной

остается виброгалтовка с абразивными гранулами, которая позволяет одновременно с упрочнением снять припуск, достаточный для удаления дефектного слоя.

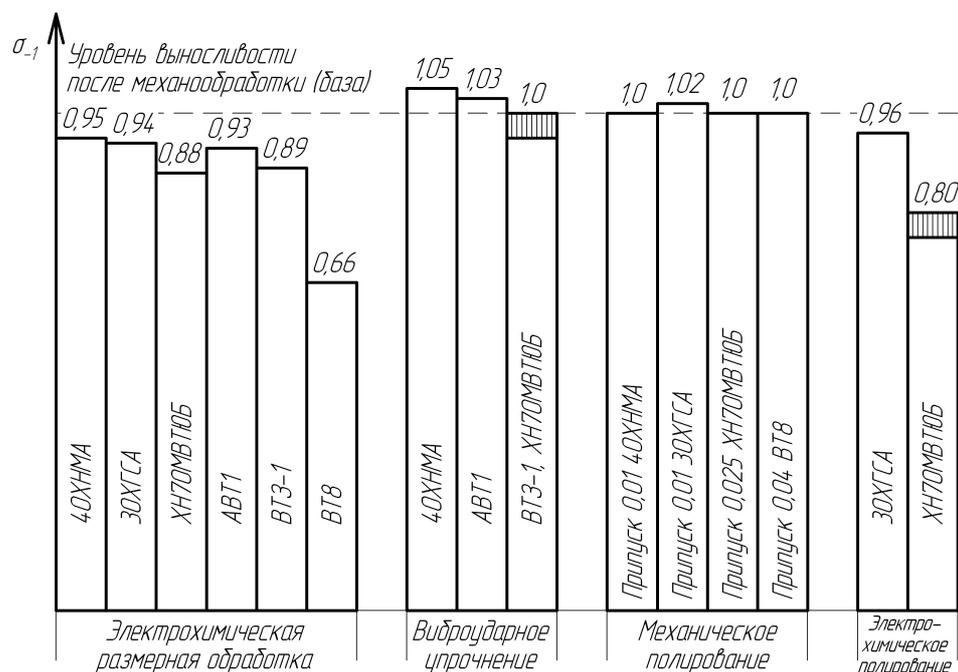


Рис. 6. Относительная усталостная прочность материалов при различных методах воздействий

Металлографические исследования образцов после финишного электрохимического полирования показали увеличение глубины микрорастравливания, что приводит к снижению предела прочности материалов. Кроме того, появляется наводороживание поверхности, что также снижает усталостную прочность. Поэтому электрохимическое полирование после ЭХРО практически не дает эффекта, кроме случаев улучшения декоративных свойств изделий.

При обработке деталей кварцевым песком и чугунной дробью был установлен эффект резкого возрастания содержания водорода в поверхностном слое сплавов, что не может быть объяснено только влажностью среды. Попытки удалить водород вакуумным отжигом не дали заметных результатов.

**Характеристики поверхностного слоя при комбинированных методах обработки (КМО).** Наиболее перспективными способами формирования поверхностей с заданными свойствами являются комбинированные процессы, часть которых показана в таблице.

Оптимальное сочетание полученных свойств различных процессов в комбинированных способах обработки позволяет формировать поверхности с заранее заданными свойствами. Приведенные в таблице процессы позволяют изменять характеристики поверхностного слоя, однако возмож-

ности здесь ограничены диапазонами измерения свойств исходных вариантов обработки.

Качество поверхностного слоя сплавов после ЭХРО  
и комбинированных методов обработки

Процесс	Шероховатость			Наклеп поверхности, %			Наводороживание		
	сталь	титанов. сплавы	алюмин. сплавы	сталь	титанов. сплавы	алюмин. сплавы	сталь	титанов. сплавы	алюмин. сплавы
ЭХРО (бесконтактный)	0,3-1,0	1,0-1,25	0,5-1,0	отсутствует			0	+	0
Электроабразивный	0,2-0,4	0,3-0,5	0,3-0,4	0	0	0	0	0	0
Обработка электродом-щеткой	2,0-2,5	-	2,5	до 15%	-	-	0	0	0
Обработка рассыпающимся катодом	0,3-0,5	0,5-0,6	0,4-0,5	до 10%	-	до 12%	+	+	0
Эрозионно-химический	2,5-5,0	3-6	-	-	-	-	0	0	0
Гальвано-механический	0,08-0,16	-	-	0	-	-	0	-	-

**Примечания:** 0 – показатель, соответствующий исходному (после механообработки);  
+ – показатель превышает исходный;  
– – данные отсутствуют

Снять ограничения по наклепу, обеспечить заданное качество поверхности и точность каналов удалось за счет комбинированного воздействия анодного растворения и упрочняющего элемента [3-5]. При этом независимо от исходного припуска за счет регулирования скорости продольного перемещения упрочняющего элемента 2 (рис.7) припуск под дорнование имеет одно и то же значение, а из-за постоянного усилия наклеп внутренней поверхности после ЭХРО рабочей частью 3 инструмента будет стабильным и будет соответствовать величине, требуемой для получения заданной усталостной прочности сплава. Здесь достигается сразу две цели: высокая точность (7-9-й квалитет, ГОСТ) и заданный наклеп при шероховатости 0,08-0,63 мкм.

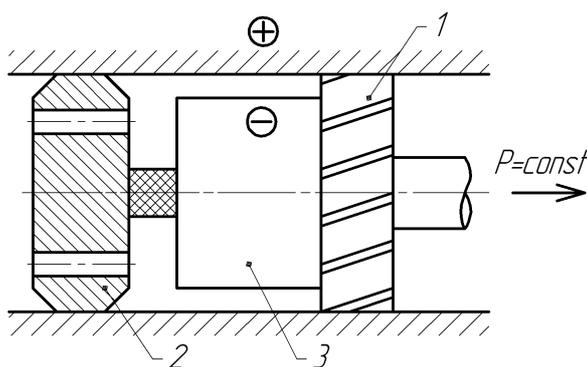


Рис. 7. Схема комбинированной обработки каналов:

- 1 – направляющий элемент; 2 – упрочняющий элемент (дорн);  
3 – инструмент для электрохимической обработки

Расчет силы перемещения комбинированного инструмента выполняется по методике, изложенной в [6].

Использование схемы, показанной на рис.7, требует поддержания расчетного усилия перемещения, которое зависит от размеров канала, свойств заготовки и температуры в зоне обработки. Оборудование для реализации способа должно быть оснащено средствами адаптивного управления процессом. Такие средства были созданы (под руководством З.Б. Садыкова) и использованы в станке СЭХО-901, выпускаемом по заказам предприятий.

#### **Выводы:**

1. Существующие технологические процессы с использованием ЭХРО позволяют получать детали с высоким качеством поверхности, обеспечивающей надежную работу изделий при циклических нагрузках.
2. С позиции обеспечения прочности для большинства случаев ЭХРО может быть реализована в качестве финишной операции.
3. Комбинированная обработка, сочетающая электрохимическую размерную обработку и методы механического поверхностного упрочнения, позволяет существенно повысить ресурс изделий за счет создания поверхностей с заранее заданными стабильными свойствами.

#### **Библиографический список**

1. Бондарь А.В. Качество и надежность / А.В. Бондарь. – М.: Машиностроение, 2007. – 308 с.
2. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей ГТД / А.М.Сулима, М.И.Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
3. А.с. 663518 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 23 Р 1/04. Способ электрохимикомеханической обработки / В.П.Смоленцев, В.С.Примак. - № 2557194; Заявлено 20.12.77; Опубл. 25.05.79; // Открытия. Изобретения. – 1979. – № 119.
4. А.с. 1085734 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 Р 1/04. Способ электрохимикомеханической обработки / А.И.Болдырев, В.П.Смоленцев. - № 3460386; Заявлено 29.06.82; Опубл. 15.04.84; // Открытия. Изобретения. – 1984. – № 14.
5. Пат. 2251472 РФ, МПК<sup>7</sup> В 23 Н 5/06, 5/10. Способ электрохимикомеханической обработки каналов и устройство для его осуществления / В.В.Долгушин, О.В.Козлова, В.П.Смоленцев, А.И.Болдырев. - № 2003129709; Заявлено 6.10.2005; Опубл. 10.05.2005; // Открытия. Изобретения. – 2005. – № 13.
6. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Ч.2: Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии и комбинированными методами / Под ред. А.И.Болдырева. – Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2008. – 136 с.

Материал поступил в редакцию 16.06.09.

**A. BOLDYREV**

**PRODUCTION OF THE SURFACE LAYER OF WORKPIECES  
DURING ELECTROCHEMICAL AND COMBINED MACHINING**

The article deals with the generation of surface layer by dimensional electrochemical and combined machining. It shows that it is possible to achieve the required performance criteria of surfaces with predetermined properties with the help of the optimum combination of processing characteristics of different processes during combined machining.

**БОЛДЫРЕВ Александр Иванович** (р. 1954), кандидат технических наук (1989), профессор (2001) кафедры «Технология машиностроения» Воронежского государственного технического университета. Имеет почетные звания: «Заслуженный работник высшей школы РФ», «Заслуженный создатель космической техники».

Научные интересы: электрические и комбинированные методы обработки.  
Опубликовано 212 научных работ.

alexboldyrev@yandex.ru