

Формирование полостей при электрохимическом гравировании сталей

С. И. Галанин, С. А. Шорохов, А. А. Магзелёва

Костромской государственной технологической университет,
ул. Лесная, 5, г. Кострома, 156005, Россия, e-mail: sgalanin@mail.ru

Исследована динамика формирования полостей и разработаны технологические рекомендации по электрохимическому гравированию сталей 40X, 5XHM, 40X13, У8 в растворах нейтральных солей при нерегулируемых межэлектродных расстояниях с учетом их микроструктуры.

Ключевые слова: электрохимическое гравирование сталей, формирование полости, микроструктура стали.

УДК 669.017:621.352

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимическое гравирование (ЭХГ) – разновидность электрохимической обработки (ЭХО) на неконтролируемых межэлектродных расстояниях, которому чаще всего подвергаются поверхности металлов и сплавов высокой твердости и прочности, а также изделий со сложно-профилированной поверхностью и с труднодоступными для механической обработки местами. Распространено при вытравливании полостей глубиной 0,01–0,2 мм с использованием различных масок, формирующих рисунки и надписи [1]. При этом форма (геометрические параметры) полостей чрезвычайно важна в случае дальнейшего инкрустирования полученного рисунка (заполнения полостей и углублений) цветными и драгоценными металлами, холодными и горячими эмалями.

Геометрия формируемых полостей определяется механизмом анодного растворения в процессе ЭХО, зависит от множества факторов: составов обрабатываемого сплава и электролита, плотности тока, температуры, зависимости выхода по току от плотности тока, гидродинамических условий, наличия и протекания явлений пассивации анодной поверхности, глубины полостей и др. [2–5].

В работе исследовалась динамика изменения формы образуемых в процессе ЭХГ полостей на различных сталях в нейтральных растворах солей. Сделана попытка определения влияния микроструктуры сталей на процесс ЭХГ. На основании экспериментальных результатов выявлены оптимальные составы электролитов и режимы обработки.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

ЭХГ проводилось на поверхности плоских образцов из сталей марок 40X, 40X13, 5XHM, У8 (табл. 1) [6].

На анодную поверхность наносилась полимерная самоклеющаяся пленка с прямоугольными вырезами размером 1,5×10 мм. Пластинчатые катоды – из стали 12X18H9T. Электролиты – водные растворы нейтральных солей (табл. 2).

Оптимальные режимы обработки (использованные при исследованиях) заранее определялись экспериментально: температура электролита $t = 15\text{--}25^\circ\text{C}$, анодная плотность тока $i = 4 \text{ A/cm}^2$, продолжительность обработки $\tau = 10, 20, 50, 70, 90, 180 \text{ мин}$.

Электролит в ванне перемешивался лопастной мешалкой. Определялись глубина полости и углы наклона стенок при помощи микроскопа МИС–11 по стандартной методике, где с помощью окуляр-микрометра фиксируются геометрические параметры полости (рис. 1 и 2).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние состава электролита и режимов ЭХГ на изменение глубины формируемой полости

Некоторые экспериментальные результаты приведены на рис. 3–6.

Для всех исследованных сталей при одинаковой продолжительности обработки наблюдается совпадающая тенденция изменения глубины формируемой полости в зависимости от состава электролита. Эта глубина при одинаковой продолжительности обработки уменьшается в следующей последовательности электролитов: 3–2–1–4. При увеличении концентрации NaNO_3 уменьшаются скорость растворения и глубина полости. Это, скорее всего, связано с пассивацией поверхности, приводящей к образованию фазовых слоев (пленок) при взаимодействии металла с окислителями, входящими в состав раствора, что осложняет процесс активации поверхности металла. При увеличении концентрации NaCl скорость съема металла и соответственно глубина формируемой полости, наоборот, возрастают,

Таблица 1. Составы исследованных сплавов

Марка стали	Компоненты (массовая доля элементов%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
40X	0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,035	до 0,035	0,8–1,1	до 0,3	до 0,3	–
5XHM	0,5–0,6	0,1–0,4	0,5–0,8	до 0,03	до 0,03	0,5–0,8	1,4–1,8	до 0,3	0,15–0,3
40X13	0,35–0,44	до 0,6	до 0,6	до 0,03	до 0,025	12–14	до 0,6	–	–
У8	0,75–0,84	0,17–0,33	0,17–0,33	до 0,03	до 0,028	до 0,2	до 0,25	до 0,25	–

Таблица 2. Составы электролитов, г/л

№ электролита	1	2	3	4
Состав	80 NaNO ₃ + 15 NaCl	50 NaNO ₃ + 50 NaCl	100 NaCl	120 NaNO ₃

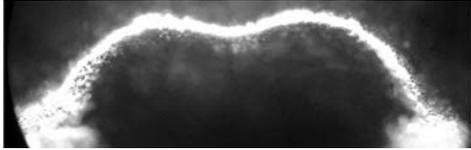
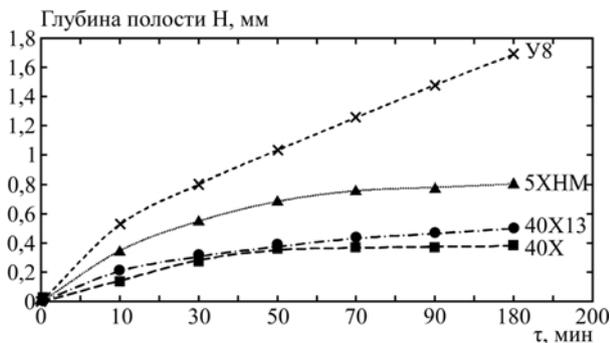
Рис. 1. Сталь У8: NaCl – 100 г/л, $i = 4 \text{ А/см}^2$, $\tau = 30 \text{ мин}$.Рис. 2. Сталь 5XHM: электролит NaCl – 100 г/л, $i = 4 \text{ А/см}^2$, $\tau = 70 \text{ мин}$.

Рис. 3. Изменение глубины формируемой полости в зависимости от продолжительности обработки в электролите № 3.

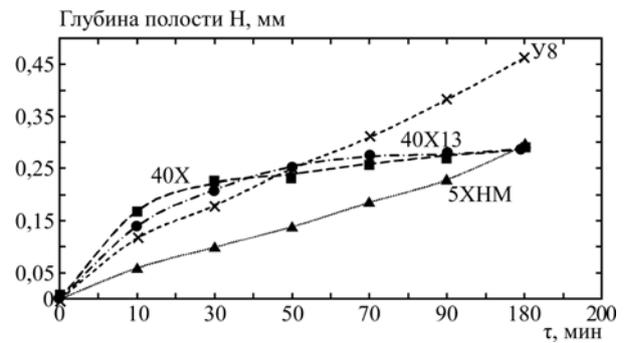


Рис. 4. Изменение глубины формируемой полости в зависимости от продолжительности обработки в электролите № 1.

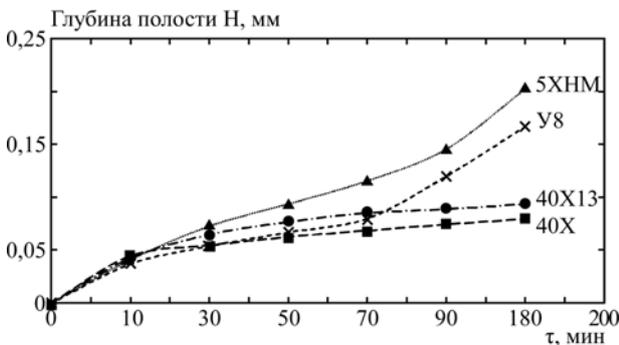


Рис. 5. Изменение глубины формируемой полости в зависимости от продолжительности обработки в электролите № 4.

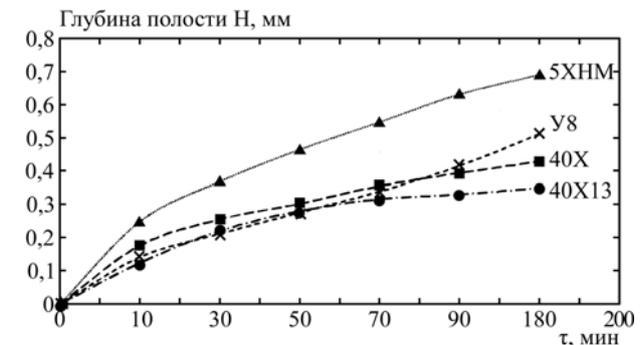


Рис. 6. Изменение глубины формируемой полости в зависимости от продолжительности обработки в электролите № 2.

что обусловлено адсорбционным вытеснением активирующими Cl-ионами пассивирующих ионов с обрабатываемой поверхности.

Наибольшая глубина полости формируется в стали У8 в электролите № 3 – 1,688 мм, наименьшая – в стали 40X в электролите № 4 – 0,08 мм.

Влияние состава электролита и режимов ЭХГ на динамику изменения геометрии формируемой полости

Для интерпретации экспериментальных результатов введем коэффициент растравливания

$K = H/(A-B)$, где H – глубина полости; A и B – минимальная и максимальная ширина полости соответственно (рис. 7).

Полученные экспериментальные зависимости изменения коэффициента растравливания K от продолжительности обработки для различных металлов представлены на рис. 8–11. Нелинейность этих зависимостей с явно выраженными экстремумами может свидетельствовать о переходе обрабатываемой поверхности в глубине и на стенках формируемой полости из активного состояния в пассивное и обратно с соответствующими изменениями выхода по току. Этот пере-

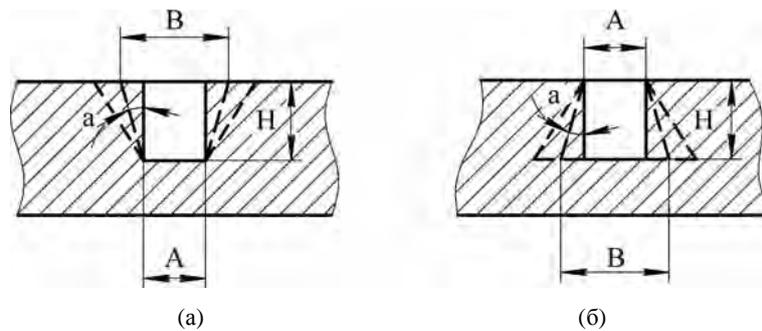


Рис. 7. Схематичное изображение полости в разрезе: (а) – при уменьшении; (б) – при увеличении ширины полости и глубины.

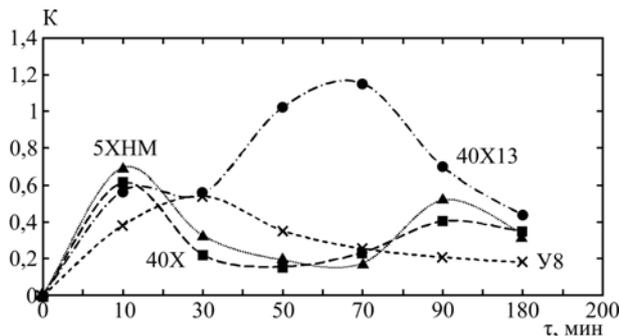


Рис. 8. Изменение коэффициента растравливания K стенок формируемой полости от продолжительности обработки τ на различных сталях в электролите № 1.

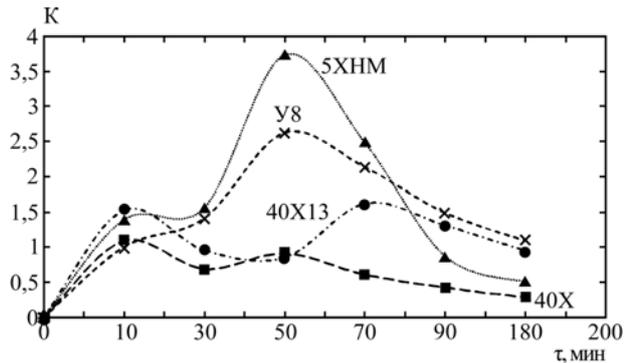


Рис. 10. Изменение коэффициента растравливания K стенок формируемой полости от продолжительности обработки τ на различных сталях в электролите № 3.

ход существенно зависит от составов обрабатываемых сплавов и электролитов, а также от изменения гидродинамики движения электролита в формируемой полости при увеличении ее глубины. Причем форма полости в течение обработки может плавно изменяться от схематично изображенной на рис. 7а к изображенной на рис. 7б и обратно.

Чем больше коэффициент растравливания, тем большей глубины можно формировать полость без изменения ее геометрии. Из приведенных результатов видно, что K на одном и том же металле при смене электролита может изменяться в очень широких пределах. При этом относительно глубокие полости с наилучшими геометрическими параметрами, характеризующиеся максимальным коэффициентом K , на каждом металле формируются в электролитах разных

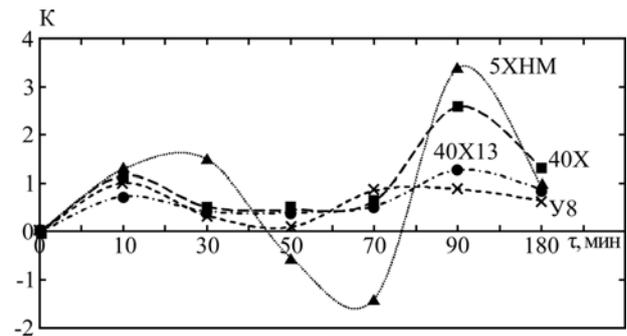


Рис. 9. Изменение коэффициента растравливания K стенок формируемой полости от продолжительности обработки τ на различных сталях в электролите № 2.

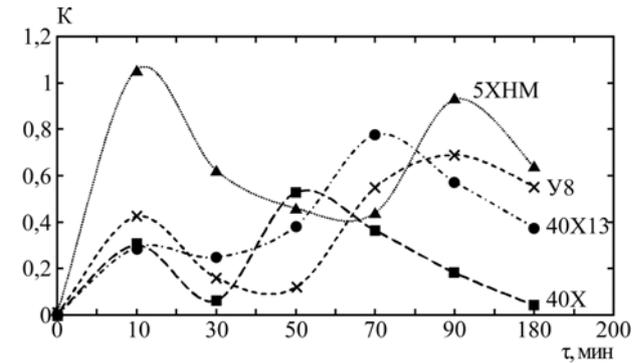


Рис. 11. Изменение коэффициента растравливания K стенок формируемой полости от продолжительности обработки τ на различных сталях в электролите № 4.

составов: для сталей 40X, 40X13, 5XHM – это 50 г/л NaNO_3 + 50 г/л NaCl ; для Y8 – 120 г/л NaCl .

Влияние микроструктуры сталей на процесс ЭХГ

На анодное поведение сталей и процесс ЭХО существенное влияние оказывают их химический и фазовый составы. Последний определяется как химическим составом сплава, так и режимом его термической обработки. Например, у отожженных и закаленных сталей одного химического состава существенно различаются зависимости выхода по току ($ВТ$) от плотности тока при ЭХО. Для отожженной стали $ВТ$ в области низких плотностей тока намного меньше, чем для закаленной, и увеличивается с плотностью тока намного быстрее. Возрастающая же зависимость $ВТ$ от плотности тока очень благоприятна для ЭХО, так как способствует высокой локализации

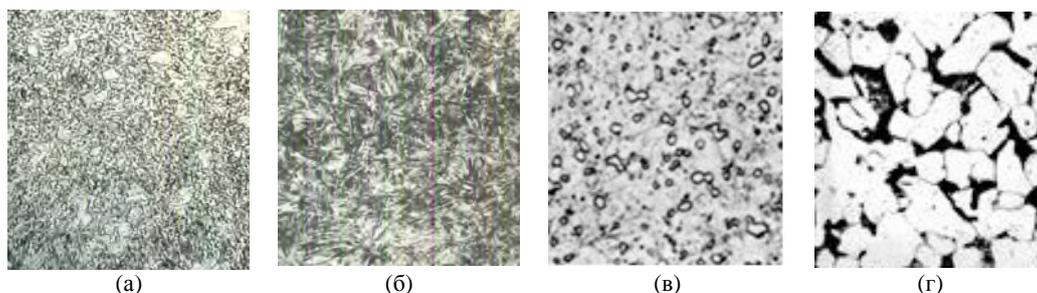


Рис. 12. Микроструктуры исследованных сталей: (а) – У8; (б) – 5ХНМ; (в) – 40Х13; (г) – 40Х.

процесса анодного растворения металла, что необходимо при выполнении ЭХГ сложных рисунков и полостей.

Способность углеродистой стали одного и того же химического состава к анодной пассивации в большей степени зависит от ее структуры. Различия в микроструктуре влияют на производительность и точность ЭХО, а также шероховатость обработанной поверхности углеродистых сталей [3–7].

Микроструктуры исследованных сталей представлены на рис. 12.

Микроструктура эвтектоидной стали У8 (рис. 12а) характеризуется колониями крупнопластинчатого перлита в зернах с хорошо различимой пластинчатой структурой. Такие крупные пластины, как правило, ухудшают механические свойства.

Сталь 5ХНМ после закалки и среднего отпуска имеет мартенситную микроструктуру с карбидами и остаточным аустенитом (рис. 12б).

Микроструктуру стали 40Х13 составляют аустенит, карбиды, мартенсит, легированные хромом, матрица – мартенсит с частицами $Cr_{23}C_6$ (рис. 12в). Образцы подвергались термообработке при $980^{\circ}C$ в течение 15 мин, последующему охлаждению в масле при $400^{\circ}C$ в течение 2 часов и заключительному охлаждению на воздухе. В матрице исходного мартенсита выделились мелкие частицы карбида. Границы первичных аустенитных зерен еще можно распознать благодаря выделениям карбидов.

Микроструктура стали 40Х состоит из перлита и феррита, легированного хромом, субструктура полосчатая, подобная перлиту (рис. 12г).

Влияние микроструктуры различно в зависимости от природы электролита: активирующий, пассивирующий и смешанный.

Анализ зависимостей (рис. 3–6 и 8–11) показывает явное влияние состава и микроструктуры исследованных сплавов на выход по току в рассмотренных электролитах, приводящее к различным скоростям растворения и формированию макро- и микрогеометрии полости.

ВЫВОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ПРОЦЕССА ЭХГ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о связи микроструктуры сталей с

процессами формирования геометрии паза при ЭХГ. Можно рекомендовать следующие режимы ЭХГ сталей 40Х, 5ХНМ, 40Х13, У8 при $i = 4 \text{ A/cm}^2$ в растворах $NaNO_3$ и $NaCl$ при нерегулируемых межэлектродных расстояниях.

1. Для формирования полостей глубиной более 0,2 мм с удовлетворительной геометрией необходим индивидуальный подбор электролитов: для сталей 40Х13, У8 – это 100 г/л $NaCl$; для 40Х, 5ХНМ – 50 г/л $NaNO_3$ + 50 г/л $NaCl$.

2. Для формирования полостей небольшой глубины 0,1–0,2 мм для сталей 40Х13, 40Х рекомендуется использовать 80 г/л $NaNO_3$ + 15 г/л $NaCl$, для сталей У8, 5ХНМ – 120 г/л $NaNO_3$.

3. Для формирования полостей с визуальной гладкой поверхностью обработку рекомендуется проводить в электролите 120 г/л $NaNO_3$.

4. В стали 5ХНМ формируются поднутрения полости в электролите 50 г/л $NaNO_3$ + 50 г/л $NaCl$, время травления 50–70 мин.

5. Анализ зависимостей рис. 3–6 и рис. 8–11 позволяет выявить закономерность: наибольшая глубина травления и максимальный коэффициент K достигаются в активирующих электролитах, наименьшая глубина травления и минимальный коэффициент K – в пассивирующих. Несмотря на то, что в пассивирующих электролитах наблюдается наибольшее растравливание стенок, небольшие значения K объясняются меньшей глубиной травления, чем в активирующих электролитах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yakovets I.V., Zvonkii V.G., Redkozubova O.O., Dikumar A.I. Determining the Degree of Electrochemical Process Localization during Anodic Etching on a Partially Insulated Surface under Controlled Hydrodynamic Conditions. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2005, **41**(3), 1–6.
2. Silkin S.A., Pasinkovskii E.A., Petrenko V.I., Dikumar A.I. Anodic Treatment of Strengthening Coatings in Electrolytes for Electrochemical Machining: II. Micromachining of Steel Surfaces Nitrated by Electrochemical Thermal Treatment: Chloride Solutions. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(1), 1–10.
3. Zhironov A.V., Komarov A.O., Danilov V.V., Shorokhov S.A. Effect of Glycerine Concentration on Dissolution and Oxidation of Mild Steel during Anodic Cementation. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(3), 289–291.

4. Ротинян А.Л., Тихонов К.И., Шошина И.А., Тимонов А.М. *Теоретическая электрохимия*. М.: Студент, 2013. 494 с.
5. Дикусар А.И., Энгельгардт Г.Р., Петренко В.И., Петров Ю.Н. *Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов*. Кишинев: Штиинца, 1983. 207 с.
6. Milella Pietro Paolo. *Fatigue and Corrosion in Metals*. Mailand: Springer-Verlag, 2012. 844 p.
7. Mittemeijer Eric J. *Fundamentals of Materials Science*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 500 p.

*Поступила 03.06.14
После доработки 29.08.14*

Summary

Dynamics of the cavities formation is investigated. Technological recommendations are developed for electrochemical engraving of steels 40X, 5XHM, 40X13, Y8 in solutions of neutral salts at unregulated interelectrode distances, taking into account their microstructure.

Keywords: electrochemical engraving of steels, cavity formation, steel microstructure.