

УДК 621.9.048.4.538.1

**А. И. Давиденко**, д-р техн. наук, проф., **В. М. Ершов**, канд. техн. наук, доцент.

**Е. В. Давиденко**, ассистент

Луганский государственный аграрный университет, ЛНР

Тел. / Факс: +38 (095) 805113; E-mail: alikdave@outlook.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 20 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ТИТАНОМ

*Исследовано влияния режимов электроискрового легирования титаном на состав и твердость поверхностного слоя малогабаритных образцов стали 20. Приведены результаты исследования влияния процессов азотирования на трещиностойкость стали 20 и способ оценки трещиностойкости на основе параметра удельной работы развития трещины, определяемого по спадающим участкам полных диаграмм деформаций "P – Δl".*

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, титан, микротвердость, трещиностойкость.

**A. I. Davydenko, V. M. Ershov, E. V. Davidenko**

### STUDY OF CRACK RESISTANCE OF STRUCTURAL STEEL 20 AFTER TITANIUM ELECTROSPARK ALLOYING

*The influence of modes of electrospark alloying with titanium on the composition and hardness of the surface layer of small-sized samples of steel 20 has been studied. The results of research of influence of nitriding processes on crack resistance of steel 20 and the method of estimation of crack resistance on the basis of the parameter of specific work of crack development, determined by descending sections of complete strain diagrams "P – Δl", are given.*

**Keywords:** electric spark alloying, titanium, microhardness, crack resistance.

#### Введение

В последние годы активно разрабатываются и внедряются в промышленность методы поверхностного упрочнения сталей и сплавов: оксидирование [1], комбинированное лазерное легирование [2], внутреннее азотирование с последующим легированием [3], ионное азотирование в тлеющем разряде [4,5], электроискровое легирование (ЭИЛ) [6-9] и др.. Применение ЭИЛ позволяет сформировать покрытие, обладающее высокими физико-механическими свойствами для повышения износостойкости и прочности режущего инструмента, деталей, нанесения антикоррозионных, фрикционных и антифрикционных покрытий на изделия.

Цель исследований: установить влияние процессов азотирования на трещиностойкость образцов стали 20 и разработка способа оценки трещиностойкости на основе параметра удельной работы разрушения  $K_\lambda$  [10], определяемого по спадающим участкам полных диаграмм деформаций "P – Δl". Задачи исследований: исследование влияния режимов ЭИЛ титаном на состав, твердость поверхностного слоя и трещиностойкость стали 20.

**Основное содержание и результаты работы.** В исследовании использовали установку чистового электроискрового легирования модели ПЭИ-1Е. Основные функциональные элементы установки включали источник постоянного тока с напряжением холостого хода от 20, 50 и 100 В, систему конденсаторов переменной емкости от 20 мкФ до 2000 мкФ (С), фиксаторов (R) от 8 до 100 Ом, систему коммутации межэлектродного зазора, вибратора с частотой 50 Гц.

В качестве электрода анода для электроискрового легирования поверхности образцов стали 20 был выбран материал титан. Использование в качестве анода при ЭИЛ титана имело своей целью создание условий формирования нитридной фазы титана, так как титан имеет большое отношение к азоту и в условиях высокотемпературного разряда образование соединения TiN опережает окисление. Титановые электроды изготавливали из сплава ВТ14 точением на диаметр  $4 \pm 0,5$  мм.

Для исследования влияния режимов электроискрового легирования титаном на состав, твердость поверхностного слоя и трещиностойкость стали 20 использовали малогабаритные образцы (рис. 1).

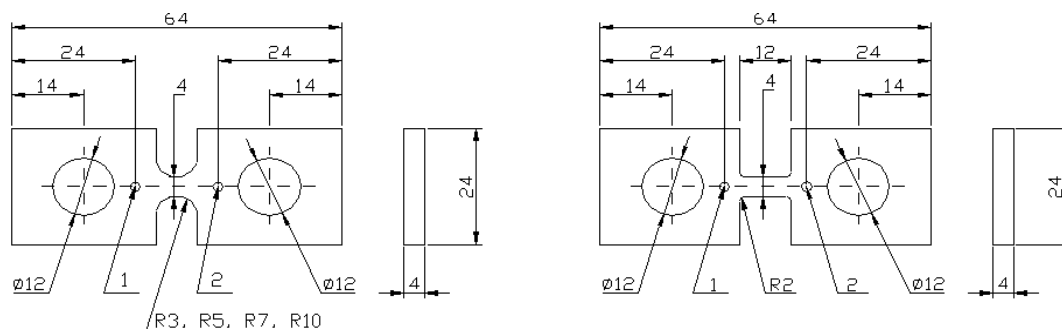


Рисунок 1. Геометрические размеры образцов.

Электроискровое легирование титаном поверхности образцов стали 20 выполняли для трех вариантов напряжения холостого хода: 20 В, 50 В и 100 В и емкости конденсатора – по 2-м вариантам: 50 мкФ и 500 мкФ. Перед искровой обработкой образцы шлифовали и наносили разметкой квадрат в 1 см для заполнения материалом покрытия. Продолжительность ЭИЛ на каждом режиме составляла 5 мин. Искровую обработку титаном выполняли при режимах, обеспечивающих плотное покрытие с минимальной шероховатостью, табл. 1. Таким образом, энергия разряда изменялась в пределах от 0,1 до 0,25 Дж.

Таблица 1. – Параметры режимов поверхностного упрочнения стали 20

Параметры режима	Энергия импульса
$I_{x.x.} = 20 \text{ В}, C = 500 \text{ мкФ}, R = 8 \text{ Ом}, \tau = 5 \text{ мин}$	0.100 Дж
$I_{x.x.} = 50 \text{ В}, C = 500 \text{ мкФ}, R = 8 \text{ Ом}, \tau = 5 \text{ мин}$	0.625 Дж
$I_{x.x.} = 100 \text{ В}, C = 500 \text{ мкФ}, R = 8 \text{ Ом}, \tau = 5 \text{ мин}$	2.500 Дж
$I_{x.x.} = 20 \text{ В}, C = 50 \text{ мкФ}, R = 8 \text{ Ом}, \tau = 5 \text{ мин}$	0.010 Дж
$I_{x.x.} = 50 \text{ В}, C = 50 \text{ мкФ}, R = 8 \text{ Ом}, \tau = 5 \text{ мин}$	0.062 Дж
$I_{x.x.} = 50 \text{ В}, C = 50 \text{ мкФ}, R = 8 \text{ Ом}, \tau = 5 \text{ мин.}$	0.250 Дж

После ЭИЛ выполняли рентгеноструктурный фазовый анализ поверхности образцов. Исследования выполняли на дифрактометре типа ДРОН-1,5 в железном излучении с использованием марганцевого фильтра.

Рентгенографирование образцов на дифрактометре ДРОН-1,5 в фильтрованном железным излучением показало наличие сильных линий нитрида титана. На дифрактограмме, приведенной на рис. 2, видно, что ЭИЛ привело к получению сильных аналитических линий (200) и (111) нитрида TiN. Кроме того, на дифрактограмме видна и сильная линия  $\alpha$ -Ti, что свидетельствует о переносе титана с анода без взаимодействия с окружающим искровой разряд воздухом.

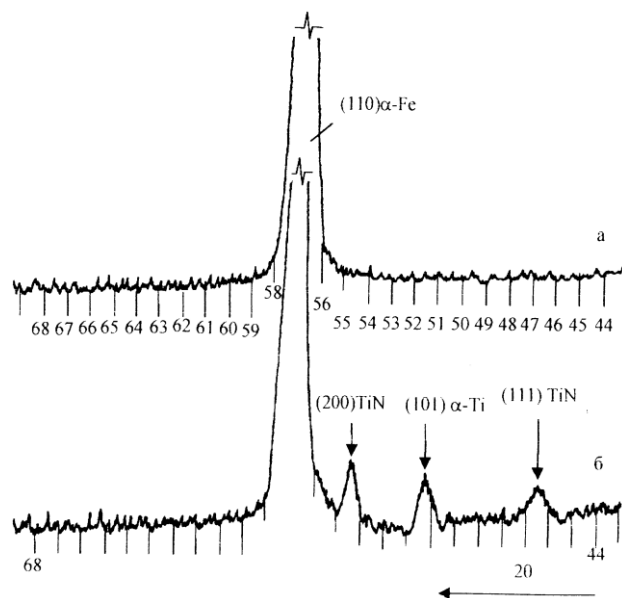


Рисунок 2. Дифрактограммы стали 20 до нанесения покрытия титаном (а) и после ЭИЛ титановым электродом (б). Параметры ЭИЛ:  $U_{x.x.} = 50$  В,  $I_{к.з.} = 3,4$  А,  $C = 500$  мкФ,  $r = 8$  Ом,  $\tau = 5$  мин. Излучение – железо.

Измерение глубины покрытия титаном проводили по методике последовательной шлифовки. Результаты измерения интенсивности аналитических линий (200) TiN и (111)  $\alpha$ -Ti приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Послойные данные интенсивности линий (200) TiN и (111)  $\alpha$  – Ti после ЭИЛ.

Глубина шлифовки, мм	Интенсивность линии (200) $\alpha$ – Ti, мм	Интенсивность линии (101) $\alpha$ – Ti, мм
0	20	15
-0.10	10	5
-0.025	5	-
-0.050	-	-

Из приведенных данных следует, что нанесение титана методом ЭИЛ обеспечивает получение слоя ( $\alpha$ -Ti + TiN +  $\alpha$ -Ti) на глубину 25–30 мкм.

Измерение микротвердости образцов на приборе ПМТ-3 показало, что для оптимальных режимов нанесения титана методом ЭИЛ значения микротвердости на поверхности находятся в пределах 9000–10000 МПа. Высокая твердость поверхностного слоя всецело определяется наличием в слое нитридной фазы титана.

В процессе испытаний были получены полные диаграммы деформирования малогабаритных образцов до и после ЭИЛ титановым электродом. В качестве параметра трещиностойкости стали принят физический параметр плотности энергии разрушения (так называемая удельная работа развития трещины), рис. 3 [34].

$$\lambda = \frac{P \cdot \Delta l_p}{2 \cdot F_k} \tag{1}$$

Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 3, где показано сопоставление диаграмм деформирования при статическом нагружении образцов стали 20 до и после электроискрового легирования титановым электродом.

Как видно из рисунка, полученные диаграммы “P–Δl” отличаются величиной предельных деформаций, углами наклона спадающего участка ветви диаграммы и значениями Δl<sub>p</sub> в зависимости от режима поверхностной обработки.

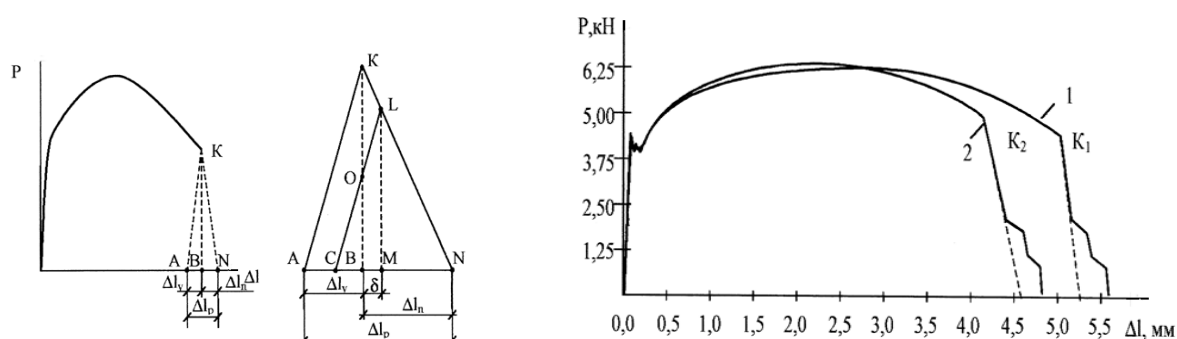


Рисунок 3. Полная диаграмма деформирования стали 20 образцов до нанесения покрытия титаном (1) и после ЭИЛ титановым электродом.

Для образцов с поверхностным электроискровым легированием титаном значение параметра Δl<sub>p</sub> увеличивается по сравнению с образцами в состоянии поставки на 12–18%. Влияние поверхностной обработки сказывается и на изменении параметра трещиностойкости K<sub>λ</sub>, который рассчитывали по соотношению:

$$K_{\lambda} = \sqrt{\frac{S_k \cdot \Delta l_p \cdot F_0 \cdot E}{F_k}} \tag{2}$$

где F<sub>0</sub> – площадь сечения рабочей части стандартных образцов до испытаний;

E – модуль Юнга.

Зависимости параметра трещиностойкости от вида напряженного состояния для базовых образцов и образцов с поверхностной обработкой Ст 20 приведены на рис. 4.

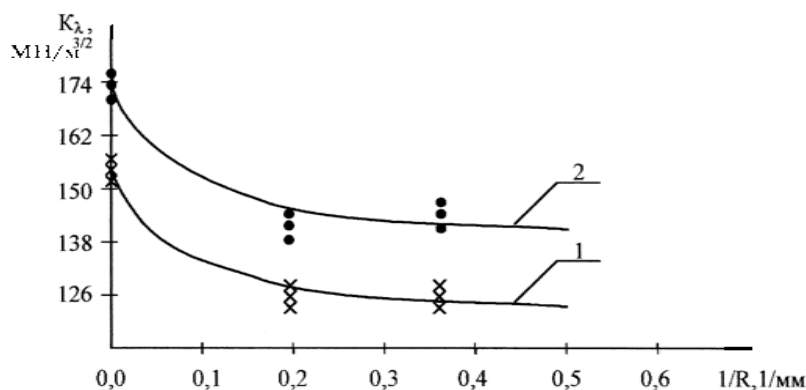


Рисунок 4. Зависимости параметра трещиностойкости  $K_{Ic}$  от вида напряженного состояния:

- 1 – для базовых образцов в состоянии поставки;
- 2 – для образцов с ЭИЛ титановым электродом.

Для вычисления критических значений коэффициентов интенсивности напряжений использовали формулу (3).

$$K_{Ic} = \sigma_k \cdot f_{Ic} \cdot \sqrt{\pi \cdot l_{кр}} \tag{3}$$

Значения вычисленных коэффициентов интенсивности напряжений приведены в табл. 4.

Таблица 4. – Параметры трещиностойкости образцов стали 20 после ЭИЛ титановым электродом

Тип образца	Условия испытаний	$\delta_{кр}$ , мм	$l_{кр}$ , мм	$\sigma_{кр}$ , кН / мм <sup>2</sup>	$Y(\lambda)$	$K_{Ic}$ , МН / м <sup>3/2</sup>
Гладкий R5 R3	Статические испытания образцов в состоянии поставки	0.01416	0.996	0.856	1.026	34.11
		0.01422	1.114	0.7170	1.034	30.44
		0.01422	1.19	0.6989	1.039	30.82
Гладкий	Испытания образцов с ЭИЛ титановым электродом	0.01	0.737	0.8786	1.035	42.964
R5	Испытания образцов с ЭИЛ титановым электродом	0.011	0.9	0.6756	1.044	36.83
R3	Испытания образцов с ЭИЛ титановым электродом	0.011 0.0157	0.9 1.234	0.6233 0.6536	1.04 1.042	35.23 29.47

Как видно из таблицы, значение коэффициентов вязкости разрушения для образцов с поверхностной обработкой ЭИЛ титановым электродом выше соответствующих значений базовых образцов в среднем на 18 %.

**Заключение.** Нанесение титана методом ЭИЛ обеспечивает получение упрочненного слоя на глубину 25–30 мкм. В связи с высокой дисперсностью структуры поверхностного слоя и наличием нитридов и карбидов, микротвердость поверхности находилась в пределах, соответствующих закаленной высокоуглеродистой стали. Высокая твердость поверхностного слоя всецело определяется наличием в слое нитридной фазы титана.

Сопоставление полученных диаграмм для образцов с азотированием с образцами в состоянии поставки позволило установить эффект увеличения трещиностойкости по параметрам полных диаграмм деформаций  $K_{\lambda}$ ,  $K_{1c}$ , в среднем, на 18 %, включая образцы с концентраторами напряжений.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лахтин, Ю. М. Влияние предварительного оксидирования на процесс кратковременного азотирования / Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Коган В. Е., Бойназаров У. Р. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1993. – № 3. – С. 12–14.
2. Чудина, О. В. Комбинированное поверхностное упрочнение стали (Лазерное легирование + азотирование) / О. В. Чудина // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1993. – № 3. – С. 3–5.
3. Петрова, Л. Г. Принцип легирования сплавов никеля, упрочняемых внутренним азотированием / Л. Г. Петрова // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1994. – № 3. – С. 5–8.
4. Панайоти, Т. А. Особенности формирования диффузионных слоев при ионном азотировании  $\alpha$ - и  $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов в интервале температур  $500^0$ – $1000^0$  С / Панайоти Т. А., Соловьев Г. В. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1994. – № 5. – С. 34–37.
5. Панайоти, Т. А. Закономерности формирования фаз при азотировании сплавов тантала с вольфрамом в тлеющем разряде / Панайоти Т. А. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1994. – № 6. – С. 15–18.
6. Лазаренко, Н. И. Технологические процессы изменения исходных свойств металлической поверхности электрическими импульсами / Н. И. Лазаренко // *Сб. трудов ЦНИЛ электрической обработки материалов.* – М.: Изд-во АН СССР. – 1960. – № 2. – 264 с.
7. Золотых, Б. Л. Физические основы электроискровой обработки металлов / Б. Л. Золотых. – М.: Гостехтеориздат, 1953. – 109 с.
8. Иванов, Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструмента и деталей машин / Г. П. Иванов. – М.: Машгиз, 1961. – 303 с.
9. Самсонов, Г. В. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Самсонов Г. В., Верхотуров А. Д. – К.: Наукова думка, 1976. – 219 с.
10. Чаусов, Н. Г. Особенности разрушения пластичных листовых материалов / Чаусов Н. Г., Лебедев А. А. // *Проблемы прочности.* – 2003. – № 4. – С. 5-13.

Поступила в редколлегию 14.03.2022 г.