

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Оптимальные режимы лазерного упрочнения твердых сплавов определили методом статистического планирования полного факторного эксперимента. В качестве функции отклика примем микротвердость  $H$  зоны воздействия излучения лазера. Основное влияние на  $H$  оказывают ско-

рость перемещения зоны нагрева  $V$  и плотность потока лазерного излучения  $q$ . Определение граничных значений этих факторов производилось на основе экспериментальных данных.

Результаты исследования по определению максимально-допустимой плотности мощности лазерного излучения при обработке различных марок твердых сплавов представлены в таблицах 1 и 2.

При увеличении плотности мощности лазерного излучения во время обработки твердого сплава ВК-8, при неизменной скорости перемещения лазерного луча по образцу, наблюдается сначала расплавление материала, а затем его растрескивание в зоне воздействия, особенно в приповерхностных слоях (табл. 1).

Таблица 1 Зависимость микротвердости поверхностного  
слоя от плотности мощности лазерного излучения

Материал	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>	Микротвердость, МПа	Состояние поверхности	Наличие трещин
ВК-8	Необработан.	15000	Исходная	-
ВК-8	$1 \cdot 10^8$	16000	Исходная	-
ВК-8	$3 \cdot 10^8$	18000	Исходная	-
ВК-8	$5 \cdot 10^8$	19000-20000	Расплав.	-
ВК-8	$1 \cdot 10^9$	21000	Расплав.	+
ВК-8	$2 \cdot 10^9$	21000-22000	Расплав.	+

Максимально достижимая плотность мощности при обработке лучом лазера сплава ВК-8 равняется  $2 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует максимально-достижимой плотности мощности, которую можно получить, используя имеющуюся фокусирующую лазерное излучение систему. Однако, из-за наличия большого количества трещин в зоне обработки, что, несомненно, отрицательно скажется на стойкости деталей и инструмента, максимальная плотность мощности не должна превышать значения  $5 \cdot 10^8 - 7 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

При обработке сплава Т15К6 наблюдается аналогичная закономерность при возрастании плотности мощности лазерного излучения (табл. 2).

Таблица 2. Изменение состояния поверхности и микротвердости  
сплава Т15К6 от плотности мощности

Материал	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>	Микротвердость, МПа	Состояние поверхности	Наличие трещин
Т15К6	Необработан.	14500		-
Т15К6	$1 \cdot 10^8$	15000-15500	Исходное	-
Т15К6	$3 \cdot 10^8$	18000	Исходное	-
Т15К6	$5 \cdot 10^8$	19500	Исходное	+
Т15К6	$1 \cdot 10^9$	20000-21000	Расплав.	++
Т15К6	$2 \cdot 10^9$	21000		++

Характер изменения микротвердости и состояния поверхности при обработке сплава Т15К6 существенно отличаются от сплава ВК8. В случае твердого сплава Т15К6 наблюдается растрескивание при более низких плотностях мощности, кроме того, при обработке на максимальных режимах, иногда, происходит даже разрушение образцов. Это объясняется, по видимому, наличием в составе твердого сплава Т15К6 карбида титана, что приводит к ухудшению теплопроводности, по сравнению со сплавом ВК-8, что в свою очередь вызывает более интенсивный нагрев при-

поверхностных слоев в зоне обработки. В результате возникают термонапряжения большой величины, которые могут превысить предел прочности самого материала, что и приводит к повышенному растрескиванию и даже разрушению образца.

Максимальная плотность мощности лазерного излучения, при обработке твердого сплава Т15К6, не должна превышать величины  $3 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Результаты по определению минимальной плотности мощности лазерного излучения при обработке лучом лазера твердых сплавов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость микротвердости вольфрамо-содержащих твердых сплавов от плотности

Материал	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>	Микротвердость, МПа
ВК-8	Необработан.	15000
ВК-8	$0,8 \cdot 10^8$	15000
ВК-8	$1,0 \cdot 10^8$	16000
ВК-8	$1,5 \cdot 10^8$	16500
ВК-8	$3 \cdot 10^8$	18000
Т15К6	Необработан.	14500
Т15К6	$0,8 \cdot 10^8$	14500
Т15К6	$1,0 \cdot 10^8$	15000-15500
Т15К6	$1,5 \cdot 10^8$	16000
Т15К6	$3 \cdot 10^8$	17500-18000

Минимальная плотность мощности, при которой еще наблюдается эффект упрочнения, для вольфрамосодержащих твердых сплавов марок ВК-8 и Т15К6 можно принять одинаковой и равной  $1,0 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Проведение аналогичных исследований позволило определить интервалы варьирования скорости перемещения пятна нагрева  $V$  для обоих видов исследуемых твердых сплавов.

Для ВК-8  $V_{\max} = 0,02$  м/с,  
 $V_{\min} = 0,007$  м/с.

Для Т15К6  $V_{\max} = 0,018$  м/с,  
 $V_{\min} = 0,008$  м/с.

В результате основные факторы будет варьировать в пределах:

Для ВК-8  $0,007$  м/с  $\leq X_1 \leq 0,02$  м/с  
 $1,0 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>  $\leq X_2 \leq 5,0 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>

Для Т15К6  $0,008$  м/с  $\leq X_1 \leq 0,018$  м/с  
 $1,0 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>  $\leq X_2 \leq 3,0 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>

Микротвердость зоны упрочнения в соответствии с матрицей полного факторного эксперимента  $2^2$  будем определять в крайних точках, для чего проведем эксперименты при четырех режимах лазерной обработки. Число повторений опытов выберем равное 3.

Таблица 4. Матрица планирования ПФЭ с натуральными переменными для твердого сплава ВК-8

N	$X_1$ м/с	$X_2$ Вт/м <sup>2</sup>	$Y_1$ МПа	$Y_2$ МПа	$Y_3$ МПа	$Y_{cp}$ Мпа	$S^2$
1	0,007	$1,0 \cdot 10^8$	15500	16200	15800	15833	82222
2	0,02	$1,0 \cdot 10^8$	19500	19800	20000	19766	51200
3	0,007	$5,0 \cdot 10^8$	17000	16500	16700	16733	42222
4	0,02	$5,0 \cdot 10^8$	18600	19000	18400	18666	62000

Таблица 5. Матрица планирования ПФЭ с натуральными переменными для Т15К6

N	$X_1$ м/с	$X_2$ Вт/м <sup>2</sup>	$Y_1$ МПа	$Y_2$ МПа	$Y_3$ МПа	$Y_{cp}$ Мпа	$S^2$
1	0,008	$1,0 \cdot 10^8$	16000	15500	16200	15900	86666
2	0,018	$1,0 \cdot 10^8$	20000	19600	19500	19700	46666
3	0,008	$3,0 \cdot 10^8$	15800	16000	15500	15766	42222
4	0,018	$3,0 \cdot 10^8$	15000	16000	15300	15433	175556

Затем переходит от натуральных переменных  $X_1$  и  $X_2$  к переменным, выраженным в нормальном масштабе.

$$Z_i = \frac{X_i - X_{cp}}{m_i}, \quad (i=1,2,3), \quad (1)$$

где  $Z_i$  – значение фактора  $X_i$  в нормированном масштабе,

$X_{cp}$  среднее значение фактора  $X_i$ ,

$m_i$  – интервал варьирования  $X_i$  относительно  $X_{cp}$ .

Из формулы верхнему уровню фактора соответствует,  $Z_i = +1$ , нижнему -  $Z_i = -1$ . Тогда матрица планирования ПФЭ примет вид (табл. 6):

Таблица 6. Матрица планирования ПФЭ с нормированными переменными для ВК-8

N	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>cp</sub>	S <sup>2</sup>	Y*	Y* <sub>cp</sub>	S <sup>*2</sup>
1	-1	-1	15500	16200	15800	15833	82222	15833	15833	82222
2	+1	-1	19500	19800	20000	19766	51200	19766	1979	51200
3	-1	+1	17000	16500	16700	16733	42222	16733	16733	42222
4	+1	+1	18600	29000	28400	18666	62000	18666	18666	62000

Таблица 7. Для твердого сплава Т15К6

N	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>cp</sub>	S <sup>2</sup>	Y*	Y* <sub>cp</sub>	S <sup>*2</sup>
1	-1	-1	16000	15500	16200	15900	86666	15900	15900	86666
2	+1	-1	20000	19600	19500	19700	46666	19700	19700	46666
3	-1	+1	15800	16000	15500	15766	42222	15766	15766	42222
4	+1	+1	15000	16000	15300	15433	175556	15433	15433	175556

Производим проверку стабильности опытов по критерию Кохрена (G). Вычислим среднее квадратичное отклонение по каждому опыту:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - y_{cp})^2}{m - 1},$$

где  $m$  – число повторений опытов.

Критерий Кохрена (G). опытный равен:

$$G_{\text{exp}} = \frac{m_4 \{S_1^2 \cdot S_2^2 \dots S_n^2\}}{S_1^2 + S_2^2 + \dots S_n^2};$$

Для твердого сплава ВК-8  $G_{\text{оп}} = 0,346$

Для твердого сплава Т15К6  $G_{\text{оп}} = 0,51$ .

Табличный критерий Кохрена при уровне значимости  $P = 0,05$  равен  $G_{\text{табл}} = 0,6841$ , т.е.:

$$G_{\text{табл}} > G_{\text{оп}}.$$

Отсюда следует, что опыты стабильны.

Уравнение регрессии в нормированном масштабе имеет вид

$$y = B_0 + B_1 Z_1 + B_2 Z_2 + B_{12} Z_1 Z_2$$

Коэффициенты регрессии определяются по формулам

$$B_0 = \frac{\sum_{i=1}^m y_{cp.n}}{n},$$

$$B_i = \frac{\sum_{i=1}^m z_m y_{cp.n}}{n},$$

где  $n$  – номер опыта.

Подставив коэффициенты регрессий в уравнение получим:

Для ВК-8  $y = 17749,5 + 1466,5 Z_1 - 50 Z_2 - 500 Z_1 Z_2$

Для Т15К6  $y = 16999,4 + 866,75 Z_1 - 1100,25 Z_2 - 1033,25 Z_1 Z_2$ .

Как видно из уравнений регрессии, судя по величине коэффициента регрессий и их знакам, наибольшее влияние на функцию отклика имеют:

для ВК-8 – скорость перемещения зоны нагрева,

для Т15К6 – как плотность мощности лазерного потока, так и скорость перемещения зоны нагрева.

Проверим несколько адекватно полученные уравнения регрессий описывают результаты опытов. Теоретические результаты  $y^*$ , рассчитанные по уравнениям регрессии занесены в таблицу 6. Рассчитаем среднее значение  $y_{cp}^*$ , между  $y_{cp}$  и  $y^*$ , вычислим среднее квадратичное отклонение между ними  $S^{*2}$  и проверим стабильность результатов по критерию Кохрена.

Теоретические результаты полностью совпали с экспериментальными ( табл. 6) и значит результаты стабильны.

Произведен проверку адекватности модели по критерию Фишера ( $F_{1-p}$ )

$$F_{1-p}(f_1, f_2) > \frac{S_1^2}{S_2^2},$$

где  $f_1, f_2$  - число степеней свободы выборки  $y_{cp}$  и  $y^*$

$$f_1 = f_2 = 15.$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n y_{cp} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_{cp,i})^2}{n} \right),$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n y_i^* - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i^*)^2}{n} \right).$$

Так как  $y_{cp} = y_i^*$  (табл. 6), то  $S_1^2 = S_2^2$  отношение  $\frac{S_1^2}{S_2^2} = 1$ .

Распределение Фишера равно  $F_{1-p} = 9,3$  при уровне значимости  $P = 0,05$  и числе степеней свободы  $f_1 = f_2 = 3$ . Отсюда  $F_{1-p} > \frac{S_1^2}{S_2^2}$  и условие адекватности выполняется.

Перейдем теперь от нормированных переменных к натуральным, для чего в уравнения регрессии подставим вместо  $Z_1$  и  $Z_2$  их значения и приведем подобные. В результате получим уравнение функции отклика:

для ВК-8 –  $y = 13916,25 + 6581,25X_1 + 2333,5X_2 - 4165 X_1X_2$

для Т15К6 –  $9729 + 15407,25 X_1 + 6668,67 X_2 - 34407 X_1X_2$

Для нахождения максимума функции отклика исследует ее на экстремум внутри области определения параметров и на ее границе. Максимальное значение  $Y$  соответствует оптимальным режимам процесса упрочнения твердых сплавов.

Решение задачи оптимизации сводится к построению и исследованию системы уравнений вида:

$$\begin{cases} (dy/dx_1) = 0 \\ (dy/dx_2) = 0 \end{cases}$$

Продифференцировав уравнение регрессий получим

$$\begin{cases} 6581,25 - 4165X_2 = 0 \\ 2333,5 - 4165X_1 = 0 \end{cases}$$

Отсюда получим  $X_1 = 0,56$  м/с  
 $X_2 = 1,58 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Для Т15К6

$$\begin{cases} 15407,25 - 34407X_2 = 0 \\ 6668,67 - 34407X_1 = 0 \end{cases}$$

Отсюда получим  $X_1 = 0,194 \text{ м/с}$

$$X_2 = 0,45 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$$

При этих значениях  $X_1$  и  $X_2$  функция отклика имеет минимум. Максимальное значение микротвердости будет при значениях  $X_1$  и  $X_2$  лежащих на границе области, а именно:  $X_1 = V = 0,02 \text{ м/с}$ ,  $X_2 = q = 5,0 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$  для сплава ВК-8 и  $X_1 = 0,018 \text{ м/с}$  и  $X_2 = 3,0 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$  для твердого сплава Т15К6.

Таким образом, методом статистического планирования полного факторного эксперимента получены следующие оптимальные режимы лазерной упрочняющей обработки твердосплавного инструмента.

Для твердого сплава ВК-8:

$$V = 0,02 \text{ м/с}, q = 5,0 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$$

При этом обеспечивается микротвердость порядка  $H = 18500 - 19000 \text{ Мпа}$ .

Для твердого сплава Т 15К6:

$$V = 0,018 \text{ м/с}, q = 3,0 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$$

При этом обеспечивается микротвердость

$H = 18500 - 19000 \text{ Мпа}$ .

УДК 621.923.7

*Шелег В.К., Войтех А.Ю., Беляев Г.Я., Синькевич Ю.В., Янковский И.Н.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ПОЛИРОВАНИИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Интенсивно развивающееся приборо- и машиностроение, постоянное повышение требований к качеству поверхности деталей, а также необходимость изготовления конкурентно способной продукции требуют применения высокоэффективных и высокопроизводительных методов обработки поверхности деталей. К таким методам относится электроимпульсное полирование (ЭИП), позволяющее достигать определенной топографии поверхности и обладающее рядом преимуществ по сравнению с другими методами финишной обработки поверхности [1].

Одной из основных геометрических характеристик качества поверхности, оказывающей значительное влияние на эксплуатационные показатели детали, является шероховатость поверхности. В настоящее время параметры шероховатости поверхности стандартизированы в международном масштабе. Их условно можно разделить на три группы [2]: высотные параметры, параметры расположения и смешанные параметры. Наиболее широкое распространение при проектировании и изготовлении деталей машин получили высотные параметры шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии –  $Ra$ , высота неровностей микропрофиля по десяти точкам –  $Rz$  и наибольшая высота неровностей –  $Rmax$ .

В результате проведенных ранее исследований [3, 4] было установлено влияние режимов ЭИП на сглаживание шероховатости поверхности углеродистых конструкционных сталей. Анализ механизма ЭИП и имеющихся экспериментальных данных позволяет предположить, что основными факторами, влияющими на сглаживание и формирование микропрофиля поверхности коррозионностойких сталей, являются высота исходного микропрофиля, время обработки, химический состав и температура электролита. Целью настоящей работы было установление взаимосвязи режимов ЭИП с высотными параметрами шероховатости поверхности коррозионностойких сталей.

Для определения влияния времени обработки, концентрации и температуры электролита на изменение высотных параметров шероховатости поверхности был проведен комплексный эксперимент. В качестве объекта исследований была выбрана коррозионностойкая сталь 20Х13. ЭИП подвергались плоские образцы с размерами 40х20х3 мм. Исходная шероховатость образцов обеспечивалась шлифованием на плоскошлифовальном станке до уровня  $Ra=1,4...0,53 \text{ мкм}$ , который обычно задается в производственных условиях перед операцией полирования. При проведении