

УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-12-22-30

**А.Г. Суслов**, д.т.н., **В.П. Фёдоров**, д.т.н., **М.Н. Нагоркин**, д.т.н.  
(ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет,  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)  
E-mail: naukatm@yandex.ru; nagorkin\_mn@mail.ru

## **Технологическое обеспечение физико-механических свойств поверхностного слоя деталей финишной электромеханической обработкой**

*Рассмотрены вопросы формирования параметров наклепа и остаточных напряжений поверхностного слоя деталей из стали 45 при финишной электромеханической обработке с использованием переменного тока. Изложены методики экспериментальных исследований и их типовые результаты в виде таблиц и графиков. Проведен анализ влияния факторов обработки на исследуемые характеристики. Получены имитационные модели их формирования в процессе обработки, которые могут быть использованы на практике. С использованием метода имитационного моделирования определена параметрическая надежность технологической системы электромеханической обработки по характеристикам физико-механических свойств поверхности.*

**Ключевые слова:** наклеп; остаточные напряжения; технологическая система; электромеханическая обработка; математические модели; надежность.

**A.G. Suslov**, Dr. Sc. Tech., **V.P. Fyodorov**, Dr. Sc. Tech., **M.N. Nagorkin**, Dr. Sc. Tech.  
(FSBEI HE Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

## **Technological support of physical-mechanical properties surface layer in parts at electro-mechanical finishing**

*The problems in the parameter formation of cold work hardening and residual stresses of a surface layer in steel 45 parts at electro-mechanical finishing with the use of alternating current are considered. There are presented procedures for experimental investigations and their standard results as tables and diagrams. The analysis of processing factor impact upon characteristics under investigation is carried out. The simulators of their formation in the course of processing which can be used in practice are obtained. With the use of the method of simulation there is defined parametric reliability of the technological system of electro-mechanical treatment on the characteristics of physical-mechanical properties of a surface.*

**Keywords:** cold-work hardening; residual stresses; technological system; electro-mechanical treatment; simulators; reliability.

Надёжность машин зависит от эксплуатационных свойств поверхностей деталей, которые определяются точностью изготовления и параметрами качества поверхностного слоя (ПКПС) – геометрическими (шероховатость, волнистость, макроотклонения) и физико-механическими (характеристики наклёпа, остаточные напряжения и др.). В частности, степенью и глубиной наклепа, величиной и знаком остаточных напряжений на поверхно-

сти детали определяются такие эксплуатационные свойства, как износостойкость и усталостная прочность деталей [1, 2, 4].

Следует отметить, что в настоящее время как в конструкторской, так и в технологической документации на детали машин практически отсутствуют данные о регламентации упомянутых величин параметров физико-механических свойств (ПФМС) поверхностного слоя. В указанных видах технической

документации уделяется большое внимание регламентации и технологическому обеспечению геометрических параметров качества поверхностного слоя, особенно параметров шероховатости, что можно объяснить следующими причинами:

1. Из геометрических ПКПС стандартизованы параметры шероховатости и отклонений от круглости, а также методики их расчета.

2. Они имеют достаточно простое и надежное метрологическое обеспечение как в рабочей зоне обрабатывающей технологической системы (ТС), так и в удаленных местах контроля. Налажено серийное производство мобильных и стационарных систем для их контроля.

3. В справочной и научной литературе имеется большое количество экспериментальных и теоретических данных по формированию их количественных значений в зависимости от условий обработки поверхностей различными методами (лезвийными, абразивными, отделочно-упрочняющими, электрофизическими и др.).

Иначе обстоят дела с ПФМС поверхностного слоя, в частности, с параметрами остаточной напряженности и наклепа: во-первых, они не стандартизованы; во-вторых, не имеют достаточно надежного метрологического обеспечения на рабочем месте, да и вообще, их измерение затруднено без разрушения контролируемой поверхности, а сам процесс проводится в лабораторных условиях при достаточно большой трудоемкости (например, при электрополировании); в-третьих, в справочной и научной литературе имеется ограниченный объем экспериментальных и теоретических данных по формированию их количественных значений в зависимости от условий обработки поверхностей различными методами. Эти обстоятельства ограничивают регламентацию ПФМС в технической документации. В лучшем случае регламентируется приоритетный метод обработки (обычно один из методов ОУО ППД), рекомендуемый в справочных или научных источниках. В связи с этим существует необходимость исследования закономерностей формирования ПФМС поверхностного слоя в зависимости от условий обработки различными методами, в первую очередь – методами ОУО ППД.

Проводились исследования технологического обеспечения характерных точек эпюры остаточных напряжений поверхностного слоя, степени и глубины наклепа цилиндрических поверхностей деталей из стали 45 в состоянии поставки в ТС электромеханической обработ-

ки (ЭМО) переменным током [1, 6]. Наряду с этим, определялась параметрическая надежность ТС по обеспечению указанных характеристик физико-механических свойств. Рабочий ролик (сталь X12M, HRC 55...60) устанавливался в устройство упругого действия (рис. 1). Эксперименты проводились на станке мод. 1К62, в качестве управляемого источника переменного тока использовался сварочный трансформатор ТСД-1000.

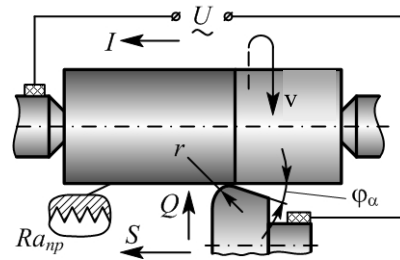


Рис. 1. Схема ТС ЭМО заготовки подвижным роликом с каплевидным контактом

Рассматривались следующие технологические факторы обработки:  $Ra_{пр}$  – параметр шероховатости поверхности после предварительной обработки (точение или шлифование периферией абразивного круга), мкм;  $I$  – сила тока, проходящего через зону контакта инструмента с деталью, А;  $Q$  – сила воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность (обеспечивалась соответствующим натягом пружины устройства упругого действия), кН;  $v$  – скорость обработки, м/мин;  $S$  – продольная подача, мм/об;  $r$  – заборный радиус ролика, мм;  $tg(\varphi_{\alpha})$  – тангенс заднего угла вдавливания ролика.

Параметр  $Ra_{пр}$  косвенно характеризует влияние технологической наследственности, так как его величина зависит непосредственно от режимов предварительной обработки.

Из множества методов ОУО ППД технологическая система ЭМО является перспективной с точки зрения формирования ПФМС поверхности детали в процессе обработки, так как она обладает технологической гибкостью и, в зависимости от выбранного технологического оборудования, может иметь до четырех степеней свободы [3]. Это дает возможность управлять одновременно четырьмя факторами обработки программным способом в пределах одного перехода, обеспечивая тем самым требуемые законы вариации параметров качества на разных участках одной и той же поверхности, что и обусловило выбор данной ТС.

Одной из задач исследований являлось по-

строение статистических моделей функции ТС одним из методов, выбранным по результатам априорной информации и с достаточной для практических целей точностью можно представить, например, в виде полиномиальной (аддитивной) модели (1) или функции Кобба-Дугласа (мультипликативная модель) (2):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (1)$$

$$Y_i = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_k^{\beta_k}, \quad (2)$$

где  $Y_i$  –  $i$ -й параметр качества поверхности детали после обработки;  $X_i$  –  $i$ -й фактор технологического процесса;  $\beta_0, \beta_i$  – истинные значения коэффициентов регрессии, которые являются случайными нормально-распределенными величинами и имеют математические

ожидания  $M\{\beta_0\} = b_0$  и  $M\{\beta_i\} = b_i$  и среднеквадратические отклонения  $S\{\beta_0\}, S\{\beta_i\}$  ( $i = 1, \dots, k$ );  $k$  – число факторов в модели.

Исследования проводились методом активного эксперимента, матрица планирования которого представляла собой дробную реплику типа  $2^{7-4}$  от полного факторного эксперимента  $2^7$ . Факторная область исследований и матрица планирования эксперимента представлены в табл. 1. Следует отметить, что опыты (1, 4, 5, 8, 10, 11, 14, 15) являются планом эксперимента в виде дробной реплики типа  $2^{6-3}$  для накатывания, так как величина тока в них мала, а остальные опыты представляют собой такую же дробную реплику для ЭМО с током  $I = 500$  А.

### 1. Факторная область исследований и матрица планирования эксперимента

Фактор	Нижний уровень «←»	Верхний уровень «→»	Код фактора	Обозначение	Матрица планирования			
					№ опыта	Условия обработки	№ опыта	Условия обработки
$Ra_{np}^*$ , мкм	<u>1,5</u> 0,35	<u>6,9</u> 1,65	$x_1$	$a$	1	(1)**	9	( $a, b, c, d, e, f, g$ )
					2	( $a, b, c, d$ )	10	( $e, f, g$ )
$I$ , А	10	500	$x_2$	$b$	3	( $a, b, e, f$ )	11	( $c, d, g$ )
$Q$ , кН	0,3	0,8	$x_3$	$c$	4	( $a, c, f, g$ )	12	( $b, d, e$ )
$v$ , м/мин	30	80	$x_4$	$d$	5	( $a, d, e, g$ )	13	( $b, c, f$ )
$S$ , мм/об	0,07	0,15	$x_5$	$e$	6	( $b, c, e, g$ )	14	( $a, d, f$ )
$r$ , мм	0,5	1,5	$x_6$	$f$	7	( $b, d, f, g$ )	15	( $a, c, e$ )
$tg(\varphi_a)$	0,006	0,012	$x_7$	$g$	8	( $c, d, e, f$ )	16	( $a, b, g$ )

*Примечания:* \* в числителе – после предварительной обработки точением; в знаменателе – обработки шлифованием; \*\* кодирование условий обработки: (1) – все факторы на нижнем уровне; ( $a, b, c, \dots$ ) – значения факторов, соответствующих буквам в скобках – на верхнем уровне, для не указанных в скобках факторов – на нижнем.

Измерения микротвердости проводились на микротвердомере ПМТ-3М (ЛОМО, Россия) с использованием фотоэлектрического окулярного микрометра ФОМ-2-16, который может сопрягаться с компьютером для оперативной обработки информации.

Исследовались следующие параметры наклепа:  $H_{\mu пов}$  – поверхностная микротвердость, ГПа;  $h_{\mu}$  – глубина наклепа, мм. Усредненные результаты эксперимента приведены в табл. 2.

### 2. Усредненные результаты измерений параметров наклепа $H_{\mu пов}$ и $h_{\mu}$

$H_{\mu пов}$ , ГПа	№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
	Значение параметра*	<u>2,9</u> 2,85	<u>3,9</u> 2,9	<u>3,8</u> 2,9	<u>3,5</u> 2,7	<u>3,4</u> 2,85	<u>3,75</u> 3,5	<u>3,3</u> 3,1	<u>2,5</u> 2,95
	№ опыта	9	10	11	12	13	14	15	16
	Значение параметра	<u>4,1</u> 2,9	<u>2,7</u> 2,8	<u>2,9</u> 3,2	<u>2,8</u> 2,95	<u>2,9</u> 3,4	<u>3,5</u> 2,75	<u>3,0</u> 2,75	<u>3,7</u> 3,3
$h_{\mu}$ , мм	№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
	Значение параметра	<u>0,1</u> 0,21	<u>0,25</u> 0,28	<u>0,2</u> 0,15	<u>0,25</u> 0,21	<u>0,13</u> 0,25	<u>0,28</u> 0,14	<u>0,33</u> 0,2	<u>0,08</u> 0,16
	№ опыта	9	10	11	12	13	14	15	16
	Значение параметра	<u>0,35</u> 0,22	<u>0,1</u> 0,31	<u>0,25</u> 0,35	<u>0,11</u> 0,1	<u>0,1</u> 0,22	<u>0,2</u> 0,18	<u>0,4</u> 0,35	<u>0,3</u> 0,2

*Примечание:* \* в числителе указаны значения после предварительной обработки точением; в знаменателе – после обработки шлифованием.

Ранжирование значимых факторов обработки по степени влияния на параметры наклепа выглядит следующим образом (слева направо степень влияния фактора убывает, в скобках указаны знак влияния фактора и величина коэффициента регрессии для кодированных переменных линейной модели вида (1)):

а) при предварительной обработке точением:

$$H_{\text{цпов}}: Ra_{\text{пр}} \rightarrow I \rightarrow \text{tg}(\varphi_{\alpha});$$

$$(0,1) \quad (0,07) \quad (0,04)$$

$$h_{\text{ц}}: Ra_{\text{пр}} \rightarrow \text{tg}(\varphi_{\alpha}) \rightarrow I \rightarrow Q \rightarrow S \rightarrow r;$$

$$(0,26) \quad (0,2) \quad (0,15) \quad (0,14) \quad (-0,08) \quad (-0,08)$$

б) при предварительной обработке круглым шлифованием:

$$H_{\text{цпов}}: Ra_{\text{пр}} \rightarrow I;$$

$$(-0,04) \quad (0,02)$$

$$h_{\text{ц}}: I \rightarrow Q \rightarrow \text{tg}(\varphi_{\alpha}) \rightarrow S \rightarrow Ra_{\text{пр}}.$$

$$(-0,15) \quad (0,1) \quad (0,08) \quad (-0,08) \quad (0,06)$$

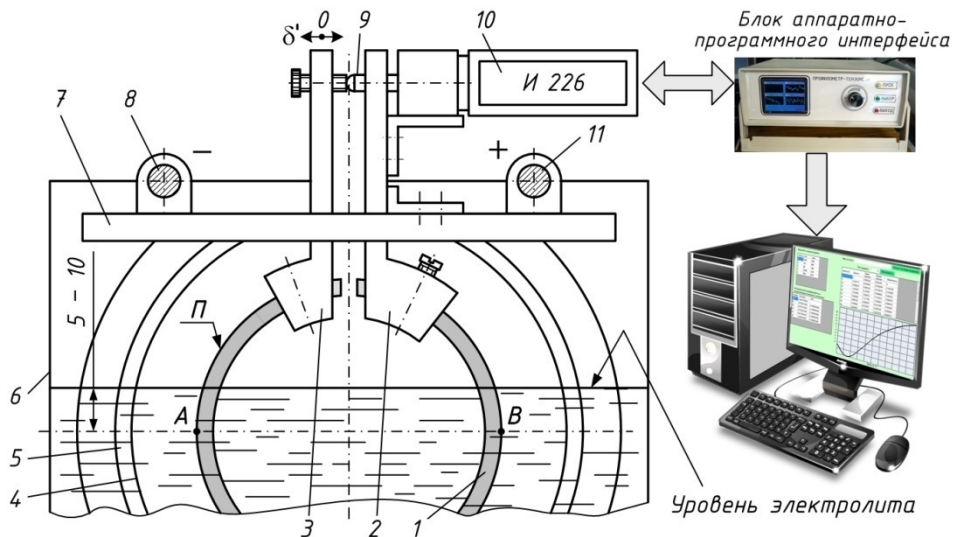
Ранжирование показывает, что наиболее сильное влияние на рассматриваемые характеристики упрочнения поверхностного слоя оказывают способ предварительной обработки, величина тока, сила обработки и задний угол вдавливания деформирующего ролика.

Расчёт величин и построение эпюры распределения остаточных напряжений по глубине проводился на основе возникающих деформаций образцов при последовательном удалении слоёв материала с исследуемой по-

верхности методом электролитического полирования.

Исследовались напряжения 1-го рода, уравнивающиеся в пределах областей, соизмеримых с размерами образца. Они обусловлены неоднородностью параметров силового, температурного или материального поля внутри тела детали, вызванной особенностями обработки или условий эксплуатации.

На рис. 2 показана схема компьютеризированной системы для измерения деформаций образца методом колец в процессе полирования. Испытуемый образец в виде кольца *1* после разрезки по образующей и предварительного укрепления на нём лапки *3* закрепляется в кольцевом вырезе держателя *2*. Держатель прикрепляется к корпусу *7*. Цилиндрическая поверхность корпуса *5* армирована свинцовой пластиной *4* (катод). Токотводящие штанги *8* и *11* имеют металлическую связь с держателем *2* и свинцовой пластиной *4*. Все поверхности, кроме половины исследуемой поверхности *П*, которая обезжиривается, покрываются хлорвиниловым лаком для защиты от травления. Использовался электролит следующего состава: 1) ортофосфорная кислота – 85 %; 2) серная кислота – 15%; 3) хромовый ангидрид – 50 г/л. Плотности кислот составляли соответственно 1,56 г/см<sup>3</sup> и 1,85 г/см<sup>3</sup>. Плотность тока не превышала 15...20 А/дм<sup>2</sup>, что при объёме электролита около 10 л обеспечивает его температуру в пределах 20...25 °С.



**Рис. 2. Схема компьютеризированной системы для измерения деформаций образца в процессе полирования и расчета параметров эпюры остаточных напряжений:**

*1* – образец-кольцо АВ с упрочненной поверхностью П ( $D_{\text{н}} = 50$  мм;  $D_{\text{вн}} = 40$  мм; ширина 10 мм); *2* – держатель; *3* – лапка для передачи деформаций штоку; *4* – свинцовый катод; *5* – кольцо-держатель катода; *6* – кислотостойкий корпус ванны; *7* – основание для крепления механических частей измерительного блока; *8, 11* – токоподводящие штанги; *9* – измерительный шток; *10* – индуктивный датчик

В основу специального программного обеспечения положен следующий алгоритм. При исследовании остаточных напряжений цилиндрических поверхностей в рассматриваемом слое тангенциальные остаточные напряжения определяются как сумма трёх составляющих:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  – напряжение, снимаемое в рассматриваемом слое в момент разрезки кольца по образующей;  $\sigma_2$  – напряжение, снимаемое в рассматриваемом слое при его удалении;  $\sigma_3$  – напряжение, снимаемое в рассматриваемом слое при удалении всех предыдущих слоёв.

Составляющие  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , входящие в формулу (3), рассчитываются по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{2E\delta_p}{D_{cp}^2} \left( \frac{h}{2} - a \right), \quad (4)$$

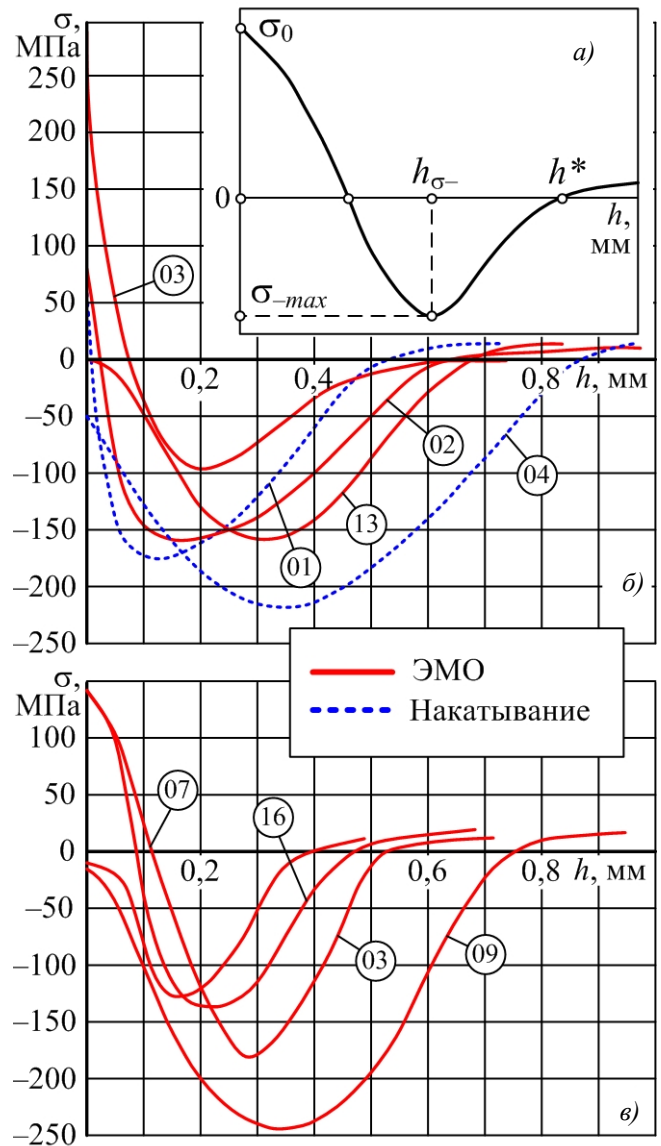
$$\sigma_2 = -\frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{D^2(a)} \frac{d\delta}{da} \approx -\frac{1}{3} \frac{E(h-a)^2}{D_{cp}^2} \frac{d\delta}{da}, \quad (5)$$

$$\sigma_3 = \frac{2E}{3} \int_0^a \frac{2h-3a+\xi}{D^2(\xi)} \frac{d\delta}{d\xi} \approx \frac{2E}{3} \left[ 2(h-a)\delta - \sum_1^{ai} \Delta i \frac{1}{2} (\delta_{i-1} \delta_i) \right], \quad (6)$$

где  $D_{cp} = (D_n + D_{вн}) / 2$  – средний диаметр кольца до разрезки, мм;  $D_n$  – наружный диаметр кольца до разрезки, мм;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр кольца до разрезки, мм;  $E$  – модуль упругости материала, МПа;  $\delta_p$  – изменение диаметра кольца после разрезки вдоль образующей;  $h$  – радиальная толщина кольца, мм;  $a$  – толщина снятого слоя, мм;  $D(a)$  – диаметр окружности центров тяжести сечений кольца после снятия слоя  $a$ , мм;  $\delta$  – изменение диаметра кольца за счёт деформации при снятии слоёв, имеющих остаточные напряжения, мм;  $\xi$  – текущая координата по глубине снятого слоя, мм;  $D(\xi)$  – диаметр окружности центров тяжести сечений кольца после снятия слоя  $\xi$ , мм;  $\Delta i = a_i - a_{i-1}$  – толщина слоя между сечениями  $a_{i-1}$  и  $a_i$ , мм.

В формулу (5) входит величина производной  $d\delta/da$ , которая определялась методом параболической аппроксимации зависимости изменения среднего диаметра  $\delta$  от толщины снятого слоя  $a$  металла с исследуемой поверхности.

Типовые усредненные результаты эксперимента представлены в виде эпюр распределения остаточных напряжений в поверхностном слое на рис. 3.



**Рис. 3. Эпюры распределения остаточных напряжений по глубине**

**поверхностного слоя после обработки (номера эпюр соответствуют номерам опытов в табл. 1):**

*a* – типовые характеристические точки; *б* – после предварительной обработки точением;

*в* – после предварительной обработки шлифованием

Эпюры имеют следующие типовые характеристические точки (рис. 3, *a*):

$\sigma_0$  – величина остаточных напряжений на поверхности;  $\sigma_{-max}$  – максимальная величина сжимающих остаточных напряжений;  $h_{\sigma-}$  – глубина залегания максимальных сжимающих остаточных напряжений;  $h^*$  – общая глубина залегания остаточных напряжений.

В результате обработки экспериментальных данных для всех исследуемых ПФМС поверхностного слоя получены физико-статистические модели вида (2), параметры которых представлены в табл. 3.

3. Результаты обработки экспериментальных данных

Факторы ЭМО	Коэффициент $b_i = M\{\beta_i\}$	Предварительная обработка	Показатели физико-механических свойств поверхностного слоя детали при ЭМО ( $Y_i$ )					
			$\sigma_0 + 1$ , ГПа	$\sigma_{-max}$ , ГПа	$h_{\sigma-}$ , мм	$h$ , мм	$H_{\mu пов}$ , ГПа	$h_{\mu}$ , мм
	$b_0$	Точение	0,67	1,059	17,96	4,27	3,94	1,02
		Шлифование	0,87	0,96	2,26	2,76	3,54	0,78
$Ra_{пр}$ , мкм	$b_1$	Точение	0,03	-0,04	-0,03	0,004	0,1	0,26
		Шлифование	-0,012	-0,05	-0,1	-0,02	-0,04	0,065
$I$ , А	$b_2$	Точение	0,03	-0,11	0,11	0,04	0,07	0,15
		Шлифование	0,035	-0,052	0,15	0,05	0,04	-0,15
$Q$ , кН	$b_3$	Точение	-0,03	0,08	0,22	0,2	0,01	0,14
		Шлифование	-0,022	0,13	0,32	0,24	0,02	0,1
$v$ , м/мин	$b_4$	Точение	-0,015	0,031	-0,15	-0,1	-0,001	-0,002
		Шлифование	-0,001	0,02	-0,1	-0,04	-0,01	-0,02
$S$ , мм/об	$b_5$	Точение	0,001	-0,01	-0,003	-0,002	-0,02	-0,1
		Шлифование	-0,018	0,03	-0,04	-0,05	-0,01	-0,1
$r$ , мм	$b_6$	Точение	-0,002	-0,04	0,085	-0,04	-0,003	-0,1
		Шлифование	0,005	0,03	0,04	0,04	-0,02	-0,04
$tg(\varphi_{\alpha})$	$b_7$	Точение	-0,03	0,13	0,22	0,1	0,045	0,2
		Шлифование	0,005	0,1	0,13	0,1	0,02	0,1

Так, модель для параметра  $h_{\mu}$  при предварительной обработке точением имеет вид:

$$h_{\mu} = 0,67(Ra_{пр})^{0,03} I^{0,03} Q^{-0,03} v^{-0,015} S^{0,001} r^{-0,02} (tg(\varphi_{\alpha}))^{-0,03}. \quad (7)$$

По критерию Фишера установлена адекватность полученных моделей.

Ранжирование значимых факторов обработки (значимость определялась по критерию Стьюдента) по степени влияния на параметры эпюр остаточных напряжений осуществлялось аналогично ранее изложенному для параметров наклепа и выглядит следующим образом (слева направо степень влияния фактора убывает, в скобках указан знак влияния фактора):

а) при предварительной обработке точением:

$$\begin{aligned} \sigma_0: & I(+)\rightarrow tg(\varphi_{\alpha})(-)\rightarrow Q(-)\rightarrow Ra_{пр}(+)\rightarrow v(-); \\ \sigma_{-max}: & tg(\varphi_{\alpha})(+)\rightarrow I(-)\rightarrow Q(+); \\ h_{\sigma-}: & Q(+)\rightarrow tg(\varphi_{\alpha})(+)\rightarrow v(-)\rightarrow I(+)\rightarrow r(+); \\ h^*: & Q(+)\rightarrow tg(\varphi_{\alpha})(+)\rightarrow v(-)\rightarrow I(+)\rightarrow r(-); \end{aligned}$$

б) при предварительной обработке круглым шлифованием:

$$\begin{aligned} \sigma_0: & I(+)\rightarrow Q(-)\rightarrow Ra_{пр}(-)\rightarrow r(-); \\ \sigma_{-max}: & Q(+)\rightarrow tg(\varphi_{\alpha})(+); \\ h_{\sigma-}: & Q(+)\rightarrow I(+)\rightarrow tg(\varphi_{\alpha})(+)\rightarrow Ra_{пр}(-)\rightarrow v(-)\rightarrow S(-); \\ h^*: & Q(+)\rightarrow tg(\varphi_{\alpha})(+)\rightarrow S(-)\rightarrow I(-)\rightarrow v(+)\rightarrow r(-). \end{aligned}$$

В моделях типа (7) для каждого параметра достаточно учитывать только те факторы обработки, которые перечислены в ранжировании. Остальные факторы статистически незначимы.

Определение параметрической надежности ТС по обеспечению ПФМС базировалось на том, что методы оценки надёжности технологических систем по параметрам качества изготавливаемой продукции в отраслях машиностроения регламентированы стандартом ГОСТ 27.202-83. Одним из критериев отказа ТС является выход хотя бы одного из регламент-

руемых показателей качества обрабатываемой детали, указанных в конструкторской и технологической документации, за допустимые пределы.

Важнейшим показателем безотказности ТС по  $i$ -му параметру качества является вероятность выполнения задания, которая определяется на основе выражения

$$\{E_{ij} \leq y_j(t) \leq E_{sj}\} \leq P_f(t). \quad (8)$$

Вероятность обеспечения ТС одновременно всех  $m$  параметров определяется следующим образом:

$$P\{E_{i1} \leq y_1(t) \leq E_{s1}; E_{i2} \leq y_2(t) \leq E_{s2}; \dots; E_{im} \leq y_m(t) \leq E_{sm}\} = P(t), \quad (9)$$

где  $E_{ij}$ ,  $E_{sjl}$  нижнее и верхнее предельные отклонения для  $i$ -го параметра, установленные нормативно-технической документацией соответственно;  $y_j(t)$  – значения  $j$ -го параметра в момент  $t$ .

Надёжность технологического обеспечения ПФМС поверхностного слоя определялась как вероятность выполнения задания для параметра  $Y_i$  в симметричном  $\delta$ -интервале  $P\{Y_i \in (\bar{Y}_i \pm \delta \bar{Y}_i)\}$  ( $0 < \delta < 1$ ).

Детально этапы определения параметрической надёжности ТС рассмотрены в работах [3, 5]. Далее определяется вероятность выполнения задания по зависимостям:

$$P\{Y_{i \min} < Y_i < Y_{i \max}\} = \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) - \Phi\left(\frac{Y_{i \min} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right), \quad (10)$$

$$P\{Y_i < Y_{i \max}\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right). \quad (11)$$

В случае двухстороннего ограничения на параметр  $Y_i$  используется зависимость (10), а в случае одностороннего – (11).

Параметрическая надёжность исследуемой ТС по обеспечению характеристик наклепа и остаточных напряжений поверхностного слоя определялась по результатам машинных экспериментов над имитационными моделями, реализованных по схеме Монте-Карло.

Результаты обработки данных машинных экспериментов, проведенных для центра факторной области при предварительной обработке круглым шлифованием ( $Ra_{пр} = 0,98$  мкм;  $I = 255$  А;  $Q = 0,55$  кН;  $v = 55$  м/мин;  $S = 0,11$  мм/об.;  $r = 1,0$  мм;  $tg(\varphi_\alpha) = 0,009$ ) показали, что нет оснований отвергать гипотезу логарифмически нормального распределения поверхностной микротвердости, так как критерий Пирсона  $\chi^2_{расч} = 14 < \chi^2_{табл} = 15,5$ . Аналогичные данные получены и для других рассматриваемых ПФМС.

Полученные результаты частично представлены на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что при предварительном круглом шлифовании надёжность обеспечения параметров  $H_{\mu пов}$ , и  $h_\mu$  выше, чем при точении (рис. 4, а). Величина  $H_{\mu пов}$  обеспечивается при равном значении  $\delta$  со значительно большей надёжностью, чем глубина наклепа для обоих случаев предварительной обработки.

Подобные результаты получены и для значений характерных точек эпюр остаточных напряжений (рис. 4, б, в). Из них наиболее высокую надёжность технологического обеспечения имеет параметр  $\sigma_0$ . Остальные параметры обеспечиваются с более низкой надёжностью, причем минимальная надёжность харак-

терна для параметра  $\sigma_{-max}$ . Это относится к обоим методам предварительной обработки. Факт наибольшей надёжности обеспечения поверхностных параметров  $h_\mu$  и  $\sigma_0$  свидетельствует о том, что ТС финишной ЭМО эффективно воздействует на поверхностный слой обрабатываемой детали. При предварительной обработке шлифованием надёжность технологического обеспечения характеристик эпюры остаточных напряжений выше, чем при предварительном точении (рис. 4, б, в).

Результаты исследований позволяют построить поля рассеяния эпюр остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя в зависимости от требуемого уровня их обеспечения. На рис. 5 представлены величины поверхностной микротвердости  $H_{\mu пов}$  и поля рассеяния эпюр остаточных напряжений при надёжности их обеспечения  $P = 0,8$ , формируемые в процессе ЭМО при предварительном точении (рис. 5, а) и круглом шлифовании (рис. 5, б).

Конфигурация эпюры остаточных напряжений определяется размерами прямоугольника  $abcd$ , формируемого за счет рассеяния величин  $\sigma_{-max}$  и  $h_{\sigma-}$ . Как уже отмечалось, эти величины имеют минимальную надёжность технологического обеспечения. Этим обусловлен тот факт, что с увеличением надёжности  $P$  возрастает рассеяние конфигурации эпюры. В достаточно узком интервале надёжно обеспечиваются значения величин  $H_{\mu пов}$  и  $\sigma_0$ , т. е. именно те параметры физико-механических свойств обрабатываемой поверхности, которые во многом определяют её эксплуатационные свойства. В связи с этим конструктору предпочтительней регламентировать значения именно этих параметров.

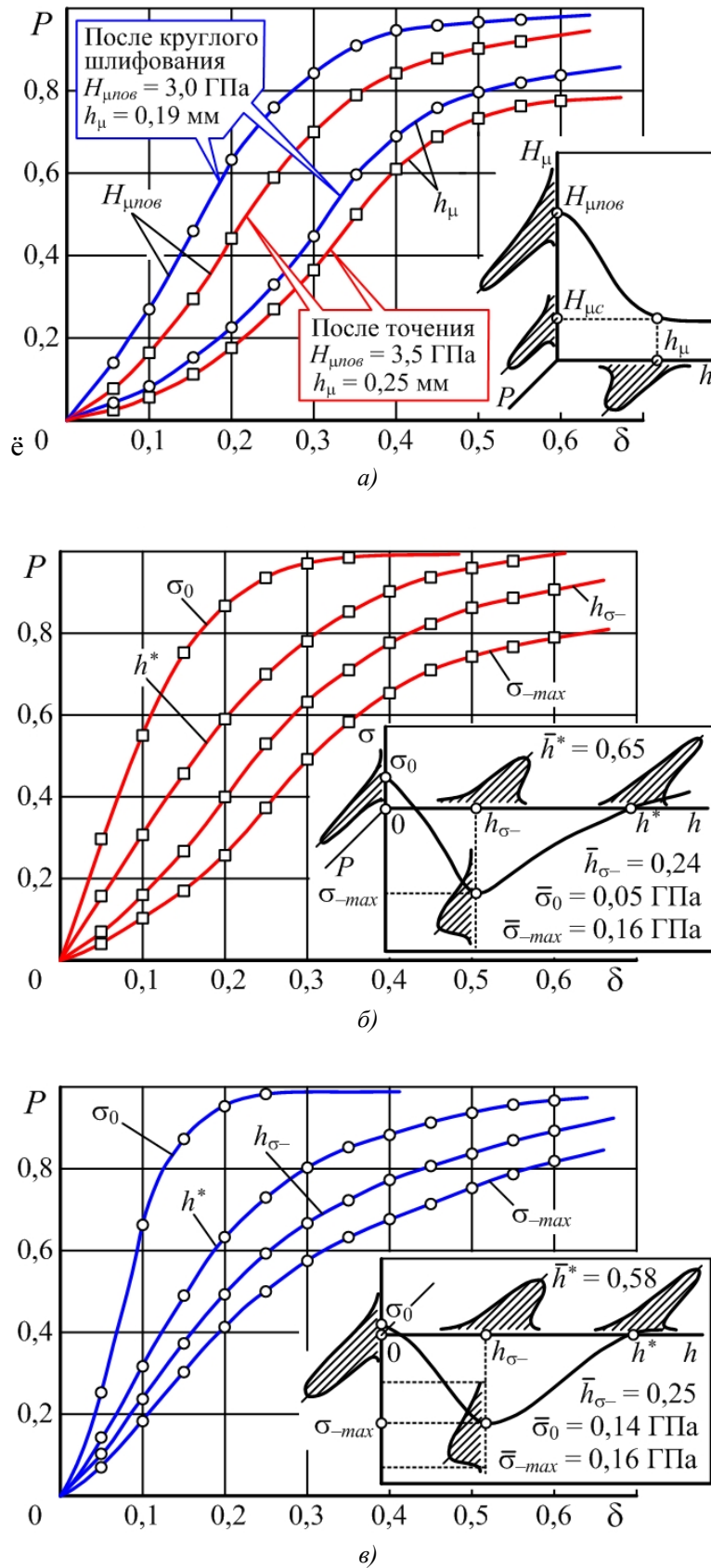


Рис. 4. Надежность технологического обеспечения параметров наклепа (а) и остаточных напряжений (б, в) поверхностей процессом ЭМО в симметричном  $\delta$ -интервале



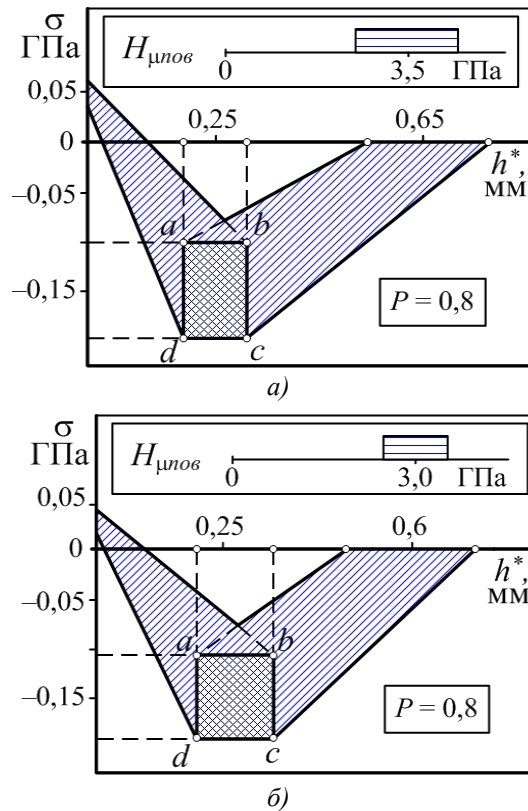


Рис. 5. Величины поверхностной микротвердости и поля рассеяния эпюр остаточных напряжений при ЭМО в зависимости от надежности технологического обеспечения:

*a* – при предварительном точении; *б* – при круглом шлифовании

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжов, Э.В., Суслов, А.Г., Фёдоров, В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин – М.: Машиностроение, 1979. – 174 с.
2. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2006. – 447 с.
3. Нагоркин, М.Н. Параметрическая надежность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. Монография / Под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 304 с.
4. Суслов, А.Г. Федонин, О.Н., Польский, Е.А. Наукоёмкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С. 34-41.
5. Федоров, В.П., Суслов, А.Г., Нагоркин М.Н. Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2019. – № 4 (94). – С. 40-48.
6. Горленко, А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке // Вестник БГТУ. – 2011. – № 3. – С. 4-8.

## REFERENCES

1. Ryzhov, E.V., Suslov, A.G., Fyodorov, V.P. *Technological Support of Machinery Operation Properties* – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 174.
2. *Technological Support and Operation Properties Increase of Parts and Their Joints* / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering. 2006. – pp. 447.
3. Nagorkin, M.N. *Parametric Reliability of Technological Systems for Finishing and Finish-Strengthening of Machinery Surface with Super-Hard Synthetic Tools*. Monograph / under the editorship of A.V. Kirichek. – М.: “Spectrum” Publishers, 2017. – pp. 304.
4. Suslov, A.G., Fedonin, O.N., Polsky, E.A. Science intensive technology for quality increase of assembly units of machinery at life stages // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.5(59). – pp. 34-41.
5. Fyodorov, V.P., Suslov, A.G., Nagorkin, M.N. Engineering methods for technological support of regulated parameters of operation surface roughness in machinery during machining // *Science Intensive technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.4(94). – pp. 40-48.
6. Gorlenko, A.O. Machinery friction surface strengthening at electro-mechanical treatment / *Bulletin of BSTU*. – 2011. – No.3. – pp. 4-8.

Рецензент д.т.н. А.В. Томай