

УДК 621.9.004

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-12-37-47

А.В. Тотай

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

Исследованы теоретический анализ и экспериментальное подтверждение зависимостей физических параметров состояния поверхностного слоя деталей машин после обработки алмазным выглаживанием. Данный подход позволил решить задачу назначения условий реализации операции алмазно-

го выглаживания, обеспечивающих требуемые эксплуатационные условия.

Ключевые слова: выглаживание, поверхностный слой, параметры, состояние, комплексная оценка.

A.V. Totai

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE PARTS SURFACE LAYER AFTER DIAMOND SMOOTHING

The work objective is the scientific rationale of forming parameters of the surface layer of machine parts by diamond smoothing. The research complexity means, first of all, analytical analysis of all active physical factors in machining and, in particular, during diamond smoothing. Based on the known dependencies from the theory of plastic deformations of metals, theoretical dependences of the yield stress during machining are obtained, taking into account the deformation rate of the metal of the surface layer and its current temperature. Using the finite element method, a graphic picture of the stress-strain state of the surface layer during diamond smoothing of various structural materials is obtained.

Dependences linking such parameters of the surface layer as the density of metal dislocations, its grit and energy state with the conditions of the diamond smoothing operation are given. Methods are proposed for providing the endurance limit by diamond smoothing according to a single-stage scheme, which implies specifying conditions for the diamond smoothing operation that directly provide a given target function - the fatigue limit. A passport of the "diamond smoothing" method is developed, taking into account the previous state of the treated surface.

Key words: smoothing, surface layer, parameters, state, integrated evaluation.

Введение

Существующие зависимости по расчету физико-механических параметров состояния поверхностного слоя (ПСПС) базируются, в основном, на геометрических и силовых условиях алмазного выглаживания [1, 2, 3].

Подобный подход дает лишь приблизительную картину деформационного процесса, так как не учитывается два важнейших фактора: скорость деформирования и температуру.

Из теории пластической деформации металлов известно, что при изотермическом процессе деформирования и сравнительно невысоких степенях деформации повышение скорости деформирования приводит к повышению напряжения текучести металла и понижению его пластичности, а действующая температура в зоне

обработки однозначно уменьшает напряжение текучести.

Учесть эти два одновременно действующих физических процесса можно с помощью коэффициента ψ , полученного на основании исследований П.М. Кука и Э. Томсена [1].

Приведенный коэффициент количественно определяется по двум характеристикам: отношению температуры в зоне деформации к температуре плавления обрабатываемого материала и скорости деформации, выраженную через соотношение скорости деформации при обработке к скорости деформации при лабораторных испытаниях материала. Подобный подход в неявной форме учитывает структуру металла и ее изменение вследствие рекристаллизации, скорость которой также зависит от температуры [4].

Основная часть

С учетом приведенных положений фактическое значение предела текучести σ'_D в процессе алмазного выглаживания может быть представлено в виде:

$$\sigma'_T = \sigma_T \left(k_\psi + m_\psi \frac{\Theta}{\Theta_{пл}} \right) \left[1 - e^{n_T(\Theta - \Theta_m)} \right], \quad (1)$$

где σ_T – значение предела текучести при стандартных испытаниях, при $\Theta/\Theta_{пл} \leq 0,3$ $k_\psi = 1$; $m_\psi = 1,5$; при $\Theta/\Theta_{пл} \geq 0,3$ $\psi = 0,35$; $m_\psi = 2,8$; Θ – действующая температура в зоне обработки, $\Theta_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала, n_T – коэффициент для нормализованных среднеуглеродистых сталей $n_T = 3 \cdot 10^{-3}$; для закаленных сталей $n_T = 1,2 \cdot 10^{-3}$; для закаленных легированных сталей $n_T = 1,4 \cdot 10^{-3}$; для легированных чугунов с ферритной структурой $1,7 \cdot 10^{-3}$; с перлитной структурой $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Для описания характера распределения тепла в объеме твердого тела можно воспользоваться интегралом вероятности

$$v_T = erf \left(\frac{1}{2\sqrt{F_{oh}}} \right), \quad (2)$$

С другой стороны, относительная избыточная температура v_T определяется

$$v_T = \frac{\Theta_k - \Theta_h}{\Theta_k - \Theta_o}, \quad (3)$$

где Θ_k – температура в контакте «инструмент – заготовка»; Θ_h – температура на глубине h , Θ_o – температура окружающей среды.

Критерий Фурье F_{oh} определяется

$$F_{oh} = \frac{a\tau}{h^2}, \quad (4)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала детали, τ – время действия теплового источника, h – расстояние от поверхности.

$$a = \alpha \sqrt[3]{2Py \left[(R_d r_{cf}) / (R_d r_{cf}) \right] \left[(1 - \mu_d^2) / E_d - (1 - \mu_a^2) / E_a \right]}. \quad (8)$$

Здесь R_d и r_{cf} – радиус детали и сферы алмаза; μ_d , μ_a , E_d , E_a – коэффициенты Пуассона и модули упругости материала детали и алмаза соответственно; $b = \beta a$.

Установлено влияние усилия выглаживания на параметры наклепа поверхностного слоя. Скорость выглаживания во всех опытах принималась постоянной и

совместно решая (2) и (3) и пренебрегая Θ_o , получим среднюю температуру в поверхностном слое глубиной h .

$$\Theta_h = \Theta_k \left[1 - erf \left(\frac{h}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right]. \quad (5)$$

Задача анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) является трехмерной и нелинейной из-за наличия зоны контакта, пластических и температурных деформаций. Для ее решения был использован метод конечных элементов (МКЭ) с включением в него блоков учета контактного взаимодействия упругопластических и температурных деформаций, а также учета изменения характеристик материала заготовки под действием температур в зоне обработки [5].

Для получения картины НДС металла поверхностного слоя были приняты диапазоны составляющих силы алмазного выглаживания: $P_z = 50-200$ Н; $P_y = 100-700$ Н; $P_x = 5-50$ Н.

В результате расчета предложена зависимость экспоненциального типа, достаточно адекватно описывающая картину НДС при алмажном выглаживании:

$$\sigma = q_0 e^{-mh}, \quad (6)$$

где σ – эквивалентные напряжения в единичном объеме на глубине h от поверхности, q_0 – среднее контактное давление между индентором и поверхностью, m – коэффициент, зависящий от механических свойств материала.

Графический характер этой зависимости представлен на рис. 1.

Значения q_0 могут быть рассчитаны по зависимости:

$$q_0 = \frac{1,5Py}{\pi ab}, \quad (7)$$

где a и b – полуоси эллипса касания инструмента с поверхностью и могут быть установлены по уравнению [6].

равной 120 м/мин, так как обработка с более высокими скоростями проходит со значительными температурами в зоне контакта инструмента и детали, а получающиеся степени наклепа, как правило, не превышают 15%, что не может считаться приемлемым для обработки поверхностным пластическим деформированием.

Подача принималась равной 0,05 мм/об, что обуславливается выбранной однопроходной схемой обработки. Радиус выглаживателя марки АСПК при обработке нормализованной стали 45 равнялся 3 мм, в остальных случаях – 1,5мм. В качестве СОЖ использовалось масло И-20А, которое способствует максимальной стойкости инструмента и обеспечивает минимальный коэффициент трения в процессе обработки.

В результате обобщения экспериментальных данных были получены графические зависимости параметров наклепа U_n и h_n от усилия выглаживания (рис. 2), которые для каждого из исследуемых материалов с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы прямыми линиями.

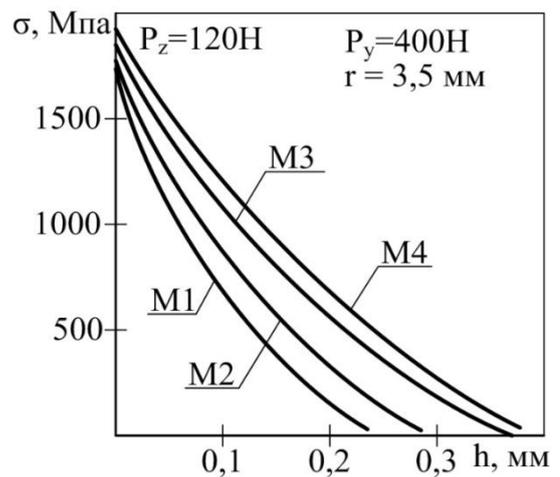


Рис. 1. Пример эпюр напряжений в поверхностном слое, полученные методом конечных элементов для алмазного выглаживания: М1 – сталь легированная закаленная; М2 – сталь углеродистая закаленная; М3 – сталь углеродистая нормализованная; М4 – чугун легированный

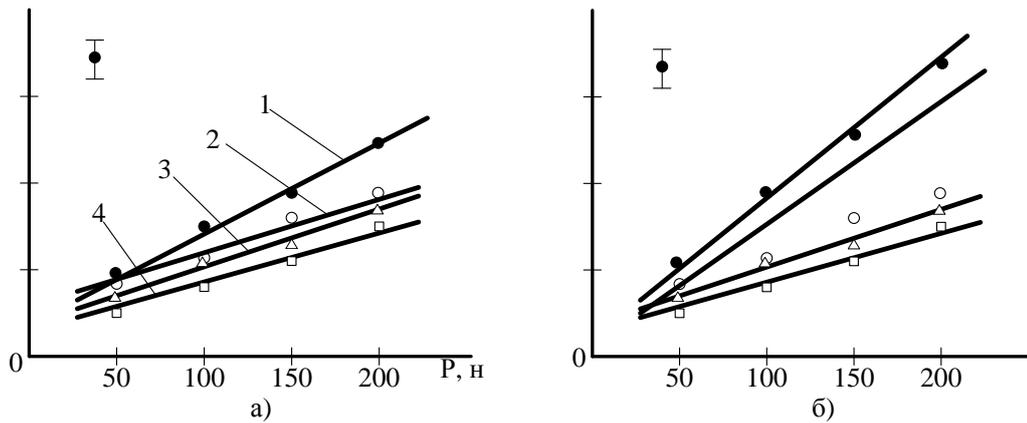


Рис. 2. Влияние усилий алмазного выглаживания на параметры наклепа:

- а) $U_n = f(p)$; б) $h_n = f(p)$;
 1 – ● – сталь 45 нормализованная; 2 – ○ – сталь 45 закаленная;
 3 – △ – сталь 65Г закаленная; 4 – □ – чугун ВПЧ

В этом случае представленные зависимости удобно выразить математически выражениями следующего общего вида:

$$U_n = a_u p + b_u \quad (9)$$

$$h_n = a_h p + b_h \quad (10)$$

Значения коэффициентов в формулах (9) и (10) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов в формулах (9) и (10)

Материал	Коэффициенты			
	a_u	b_u	a_h	b_h
Сталь 45 нормализованная	0,0015	1,15	0,0015	0,03
Сталь 45 закаленная	0,0013	1,10	0,0013	0,016
Сталь 65Г закаленная	0,0011	0,95	0,0008	0,021
Чугун ВПЧ	0,0014	1,05	0,0015	-0,015

Параметры макронапряжений, сформированные в поверхностном слое исследуемых

материалов в зависимости от усилия выглаживания, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров макронапряжений

Уси- лие вы- глажи- вания, Н	Материал							
	Сталь 45 нормализованная				Сталь 45 закаленная			
	50	100	150	200	50	100	150	200
σ_t	-42,4	-173	-308,7	-422,5	-128,3	-241,6	-348,5	-454,3
σ_{max}	-72,8	-296,6	-536,3	-736,9	-222,1	-432,9	-636,3	-842,8
$h_{\sigma_{max}}$	0,096	0,186	0,252	0,342	0,068	0,148	0,206	0,258
σ_0	-76,2	-301,4	-544,7	-742,3	-244,1	-452,9	-657,3	-863,2
	Сталь 65Г закаленная				Чугун ВПЧ			
	50	100	150	200	50	100	150	200
σ_t	-308,3	-402,6	-497,2	-603,6	-82,6	-220,3	-368,4	-511,7
σ_{max}	-568,8	-742,9	-921,4	-1116	-136,3	-364,2	-605,5	-844,2
$h_{\sigma_{max}}$	0,059	0,142	0,202	0,268	0,044	0,082	0,127	0,169
σ_0	-581,6	-756,3	-938,2	-1139	-142,2	-371,4	-620,6	-868,8

Как видно из данных таблиц, тангенциальные и осевые напряжения носят сжимающий характер, абсолютные значения которых растут с увеличением нагрузки на инструмент и твердости обрабатываемого материала. Стабильность в формировании сжимающих напряжений может быть объяснена существенным преимуществом деформационного фактора над тепловым, что связано с относительно малыми скоростями выглаживания и значительно меньшими коэффициентами трения искусственного алмаза с деталью при наличии смазки, чем при лезвийных и абразивных методах обработки. Интересными представляются данные по динамике роста макронапряжений в зависимости от материала и усилия выглаживания. Так, с увеличением усилия выглаживания в 4 раза (с 50 до 200Н) величина поверхностных тангенциальных сжимающих напряжений из

стали 45 нормализованной увеличивается почти в 10 раз, у закаленной стали 45 – в 3,5 раза, у закаленной стали 65Г – в 2 раза, а у чугуна – более чем в 6 раз. В нашем случае для сталей прослеживается четкая связь: чем меньше предел текучести и модуль упругости обрабатываемого материала, тем большие возможности имеет алмазное выглаживание с точки зрения управления параметрами макронапряжений.

На основании экспериментальных данных получены зависимости для расчета поверхностных тангенциальных остаточных напряжений σ_{t_0} и глубины залегания максимальных напряжений $h_{\sigma_{max}}$:

$$\sigma_{t_0} = a_t P + b_t, \quad (11)$$

$$h_{\sigma_{max}} = a_h P + b_h. \quad (12)$$

Таблица 3

Значения коэффициентов в уравнениях (11) и (12)

Материал	Коэффициенты			
	a_t	b_t	a_h	b_h
Сталь 45 нормализованная	0,0014	1,16	0,0014	0,028
Сталь 45 закаленная	0,0013	1,10	0,0013	0,015
Сталь 65Г закаленная	0,0010	0,94	0,0007	-0,005
Чугун ВПЧ	0,0012	1,08	0,0013	-0,015

Из теории пластических деформаций металлов известно, что напряжение текучести в значительной степени оказывает влияние размер зерна металла поверхностного слоя. Холла-Петчем была получена зависимость фактического значения предела текучести σ_T' от размера зерна

$$\sigma_T' = \sigma_T + cd^{-0,5}, \quad (13)$$

$$d = \left\{ c / \sigma_T \left[\left(k_{\psi} + m_{\psi} \frac{\Theta}{\Theta_{\text{пл}}} \right) \left(1 - e^{n_T(\Theta - \Theta_{\text{пл}})} \right) - 1 \right] \right\}^2. \quad (14)$$

Кроме среднего размера зерна на предел текучести значительное влияние оказывает плотность дислокаций ρ в металле поверхностного слоя

$$\sigma_T' = \sigma_T + \alpha_{\rho} Gb\sqrt{\rho}, \quad (15)$$

где α_{ρ} – коэффициент, G – модуль сдвига, b – вектор Бюргера.

С учетом выражения (13) будем иметь

$$\rho = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{c}{\alpha_{\rho} Gb}}. \quad (16)$$

где σ_T – табличное значение предела текучести материала, c – константа, d – средний размер зерна.

С учетом уравнения (1) можно получить зависимость фактического размера зерна поверхностного слоя от температурных и скоростных факторов алмазного выглаживания

Обозначив $\sqrt{\frac{c}{\alpha_{\rho} Gb}}$ через m_{ρ} получим

$$\rho = m_{\rho} / d. \quad (17)$$

Последнее выражение объясняет увеличение плотности дислокаций при измельчении зерна термическим или механическим воздействием. Результаты и условия проведения экспериментальных исследований размера зерна и плотности дислокаций приведены на рис. 3 и в табл. 4.

Таблица 4

Условия проведения экспериментов

Исследуемый параметр	Материал	Кривая	$P, \text{ Н}$	$S, \text{ мм/об}$	$V, \text{ м/мин}$
Средний размер действительного зерна	Сталь 45 Нормализованная	1	50-250	0,05	120
		2	150	0,05-0,15	120
		3	150	0,05	40-200
	Сталь 45 закаленная	4	50-250	0,05	120
		5	150	0,05-0,15	120
		6	150	0,05	40-200
	Сталь 65Г закаленная	7	50-250	0,05	120
		8	150	0,05-0,15	120
		9	150	0,05	40-200
Плотность дислокаций	Сталь 45 нормализованная.	10	50-250	0,05	120
		11	150	0,05-0,15	120
		12	150	0,05	40-200
	Сталь 45 закаленная	13	50-250	0,05	120
		14	150	0,05-0,15	120
		15	150	0,05	40-200
	Сталь 65Г закаленная	16	50-250	0,05	120
		17	150	0,05-0,15	120
		18	150	0,05	40-200

Характерной особенностью алмазного выглаживания при формировании сред-

него размера зерна и плотности дислокаций являются на порядок превышающие

значения ρ , что объясняется сутью самого метода обработки, связанного с затратой практически всей энергии процесса на пластическое деформирование металла поверхностного слоя. Например, при выглаживании закаленной стали 65Г плотность дислокаций при $P = 150$ Н, $S = 0,05$ мм/об и $V = 40$ м/мин достигает значения, приблизительно равного $1,25 \cdot 10^{11}$ см⁻².

Как известно, реальная поверхность твердого тела всегда покрыта слоями адсорбатов, пленкой оксида, что приводит к видоизменению энергетического спектра существующих электронных состояний. Вследствие неоднородности структуры поверхность является источником генерирования дислокаций, что неизбежно сказывается на ее механических свойствах.

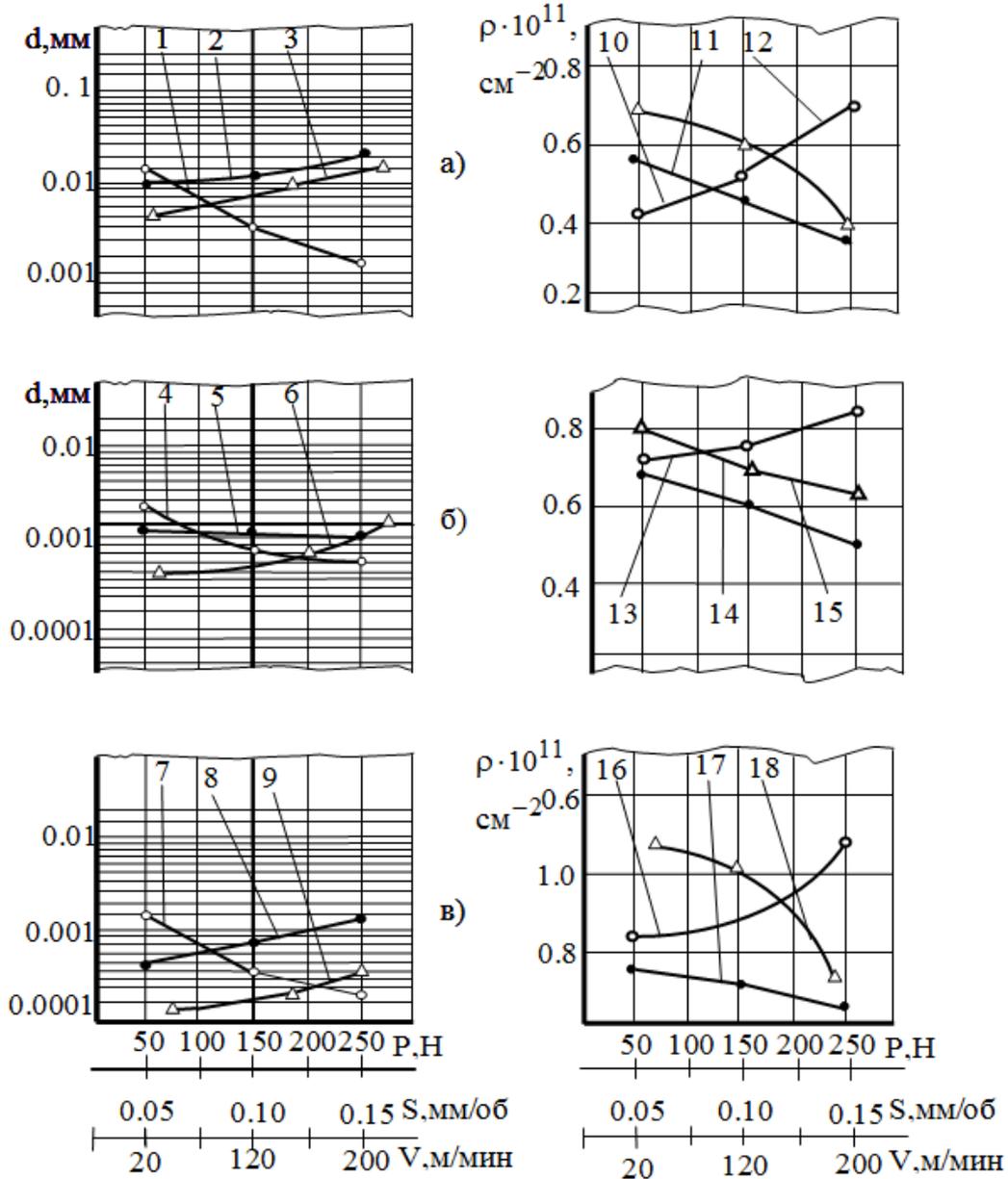


Рис. 3. Влияние факторов алмазного выглаживания на средний размер зерна и плотность дислокаций:

а – ст. 45 норм.; б – ст. 45 закал.; в – ст. 65Г закал.;

●● – S ; ○○ – ρ ; ▲▲ – V .

Комплексную оценку энергетического состояния реальной поверхности твердого тела может дать метод экзоэлектрон-

ной эмиссии (ЭЭЭ), который в прикладных задачах используют в качестве неразрушающего контроля. В данной работе при-

менялась фотостимулированная ЭЭЭ, регистрируемая в процессе освещения при постоянной температуре [7].

В табл. 5 приведены коэффициенты парной корреляции между параметрами состояния поверхностного слоя и уровнем ЭЭЭ I.

Таблица 5

Значения коэффициентов парной корреляции между ПСПС

Параметры	R_a	H_μ	U_n	σ_o	d	ρ	I
R_a	1,00	-0,31	-0,33	0,43	-0,63	-0,11	-0,47
H_μ		1,00	-0,96	0,27	0,91	0,89	0,92
U_n			1,00	0,14	0,86	0,89	0,87
σ_o				1,00	0,21	0,36	0,08
d					1,00	0,82	0,92
ρ						1,00	0,91
I							1,00

Если условно разделить включенные в корреляционный анализ микрогеометрические и физические параметры на две группы, то можно сказать, что поверхностная микротвердость, коэффициент степени наклепа, номер зерна и плотность дислокаций проявляют очень тесную связь с ЭЭЭ, а среднее арифметическое отклонение профиля и поверхностные тангенциальные макронапряжения слабо коррелируют с исследуемым параметром. В свою очередь, если посмотреть на коэффициенты парной корреляции между H_μ , U_n , d , ρ , то все они укладываются в диапазон значений 0,82-0,92, что говорит об их сильном взаимовлиянии. Поэтому связь первой группы параметров с ЭЭЭ необходимо рассматривать в комплексе. Итак, с увеличением поверхностной микротвердости и, следовательно, коэффициента степени наклепа наблюдается уменьшение размера зерна (увеличение его номера) и увеличение плотности дислокаций. Эта статистическая оценка не противоречит физической картине, имеющей место в поверхностном слое. Так как увеличение твердости не что иное как повышение сопротивляемости металла пластической деформации, то в подавляющем большинстве случаев это связано с уменьшением размеров зерен поликристаллических материалов и с увеличением плотности дислокаций (или, в общем случае, несовершенств) в их структуре.

Указанные два последних фактора значительно тормозят движение дислокаций в реальной кристаллической решетке поликристаллов, что объясняется барьерным действием границ зерен (чем зерно меньше, тем границ больше) и «запирающим» свойством дислокационных плоскостей.

Тесная корреляционная связь рассмотренных четырех факторов на величину экзоэмиссии и объясняется как раз чувствительной реакцией этого метода на дефектность материала, увеличение которой сопровождается значительным ростом в поверхностном слое числа экзоэлектронов.

Проведенный анализ подтверждает возможность использования ЭЭЭ в качестве неразрушающего метода оценки физико-механических параметров поверхностного слоя деталей машин.

Накопление усталостных микротрещин в наиболее нагруженном участке детали происходит на протяжении технологического и эксплуатационного периода ее жизненного цикла [8, 9]. Кроме того, на стадии изготовления заготовки также происходит формирование определенной исходной плотности дислокаций $\rho_{исх}$. Таким образом, уравнение, описывающее процесс количественного накопления усталостных повреждений в процессе технологического воздействия и эксплуатации будет выглядеть:

$$\rho = \rho_{исх} + \left[\frac{4\pi}{b} (1 + \mu) \right]^2 \left\{ E^{-2} \left[\left(\frac{\sigma_{mx}}{\psi_{mx}} \right)^2 + N \left(\frac{\sigma_3}{\psi_3} \right)^2 \right] \right\}, \quad (18)$$

где $\psi_{ТХ}$ и ψ_3 - значения коэффициентов в процессе изготовления и эксплуатации

соответственно, N – в общем виде число циклов нагружения.

Число циклов достижения критической плотности дислокаций

$$N = \frac{\rho - \left\{ \rho_{исх} + \left[\frac{4\pi}{b} (1 + \mu) \right]^2 \left(\frac{\sigma_{ТХ}}{\psi_{ТХ} E} \right)^2 \right\}}{\left[\frac{4\pi}{b} (1 + \mu) \right]^2 \left(\frac{\sigma_3}{\psi_3 E} \right)^2}, \quad (19)$$

или, обозначив $\frac{4\pi}{b} (1 + \mu)$ через $\omega = \text{const}$ для данного материала, получим

$$N = \frac{\rho - \left\{ \rho_{исх} + \omega^2 \left(\frac{\sigma_{ТХ}}{\psi_{ТХ} E} \right)^2 \right\}}{\omega^2 \left(\frac{\sigma_3}{\psi_3 E} \right)^2}. \quad (20)$$

Критическую плотность дислокаций с достаточной для практических задач точностью можно рассчитать по зависимости

$$\rho = \left(\frac{2\pi k_p \sigma_b}{Gb} \right)^2, \quad (21)$$

где σ_b – предел прочности, $k_p = 0,5 \dots 0,7$, G – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса.

Основным технологическим фактором, формирующим физико-механические и, следовательно, эксплуатационные параметры поверхностного слоя является усилие выглаживания. На рис. 4 приведены графические зависимости предела выносливости от усилий P при испытаниях на базе $N = 10^7$.

Увеличение усилий алмазного выглаживания со 100 до 900Н не обеспечивает монотонного увеличения предела выносливости. Наибольшее значение σ_{-1} зафиксировано при $P = 400$ Н и равно 440 МПа, в то время, как при $P = 900$ Н σ_{-1} уменьшилось до 410 МПа, что связано с очень высокой плотностью дислокаций, достигающей $0,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и практическим отсутствием серьезного резерва по возможностям пластического деформирования металла и более быстрому переходу к режиму хрупкого разрушения, чем при

меньших усилиях алмазного выглаживания [10, 11].

В ряде случаев при технологическом обеспечении какого-либо уровня эксплуатационной надежности не обязательно иметь возможность и информацию по двухступенчатому подходу к этой проблеме: т.е. устанавливать зависимости физико-механических параметров от условий обработки, а затем уже их влияние на показатель эксплуатации.

Достаточно эффективным может быть и одноступенчатый подход, предполагающий получение теоретических или эмпирических зависимостей, например, предела выносливости непосредственно от условий обработки. Ниже приведены зависимости предела выносливости от операционных режимов алмазного выглаживания:

– закаленная сталь 45

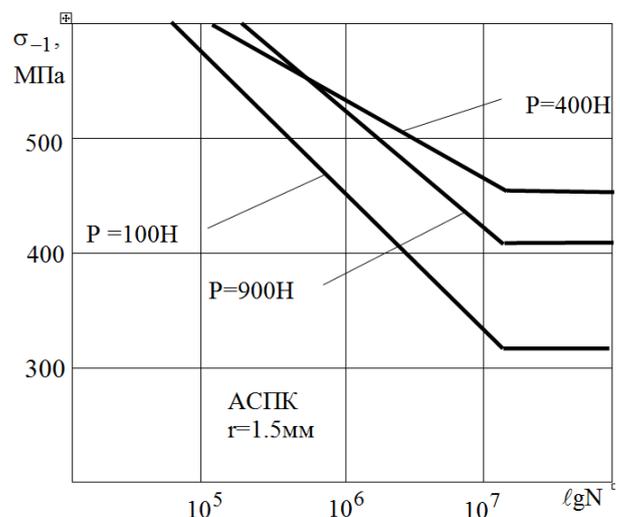


Рис. 4. Влияние усилия алмазного выглаживания образцов из закаленной стали 12ХНЗА на предел выносливости

$$\sigma_{-1} = 345,2 + 0,12P + 28,7S - 0,074V + 6,14r \quad (22)$$

– закаленная сталь 65Г

$$\sigma_{-1} = 361,3 + 0,09P + 31,2S - 0,088V + 7,28r. \quad (23)$$

В табл. 6 представлен паспорт алмазного выглаживания, дающий достаточно полное представление о его технологических возможностях с точки зрения обеспе-

чения того или иного эксплуатационного условия, а также классификация материалов к этой таблице (табл. 7).

Таблица 6 а

Паспорт метода «Алмазное выглаживание»

Исходное состояние поверхности			Достижимые характеристики качества обработки				
Материал (код)	Квалитет точности	Ra , мкм	Квалитет точности	Ra , мкм	d , номер	$\rho \cdot 10^{11}$, см ⁻²	I , с ⁻¹
1	7-8	1,25-2,5	7-8	0,16-0,32	9-10	0,4-0,8	500-700
	6-7	0,63-1,25	6-7	0,08-0,16	9-11	0,4-0,8	500-700
2	7-8	1,25-2,5	7-8	0,16-0,32	10-12	0,7-1,0	650-800
	6-7	0,63-1,25	6-7	0,08-0,16	12-14	0,7-1,0	650-800
3	7-8	1,25-2,5	7-8	0,16-0,32	12-14	1,0-1,2	800-900
	6-7	0,63-1,25	6-7	0,08-0,16	13-15	1,0-1,2	800-900
4	7-8	1,25-2,5	7-8	0,16-0,32	13-16	1,1-1,4	900-1100
	6-7	0,63-1,25	6-7	0,08-0,16	14-17	1,1-1,4	900-1100
5	7-8	1,25-2,5	7-8	0,16-0,32	-	-	700-800
	6-7	0,63-1,25	6-7	0,08-0,16	-	-	700-800
6	7-8	1,25-2,5	7-8	0,16-0,32	-	-	750-900
	6-7	0,63-1,25	6-7	0,08-0,16	-	-	750-900

Таблица 6 б

Паспорт метода «Алмазное выглаживание»

Материал (код)	Условия обработки			
	Марка алмаза радиус	P , Н	S , мм/об	V , м/мин
1	АСПК/2	100	0,07-0,09	120
	АСПК/2	120	0,05-0,07	160
2	АСПК/2	150	0,07-0,09	120
	АСПК/2	180	0,05-0,07	160
3	АСПК/1,5	180	0,07-0,09	120
	АСПК/1,5	200	0,05-0,07	160
4	АСПК/1	200	0,07-0,09	120
	АСПК/1	240	0,05-0,07	160
5	АСПК/1,5	200	0,07-0,09	100
	АСПК/1,5	220	0,05-0,07	120
6	АСПК/1	220	0,07-0,09	80
	АСПК/1	240	0,05-0,07	110

Так как алмазное выглаживание в подавляющем большинстве случаев является финишной операцией технологического процесса, то на практике назначение

условий выглаживания в «ручном» или автоматизированном варианте должно учитывать предшествующую обработку, что наглядно видно из табл. 6.

Классификация материалов к таблице 6

Материал	σ_T , МПа/ $\sigma_{0,2}$ МПа	Код
Закаленные конструкционные и легированные стали	300-500	1
	500-800	2
	800-1200	3
	Свыше 1200	4
Высокопрочные чугуны	200-400	5
	400-600	6

Заключение

Проведенные исследования подтвердили необходимость при анализе ПСПС учета всех факторов механической обработки конструкционных материалов, а именно силовых, температурных и скоростных. Подобный подход позволяет получать аналитические зависимости параметров состояния поверхностного слоя при различных условиях технологических операций. Также в работе исследованы размеры зерна поверхностного слоя и плотность

дислокаций металла, которые позволяют спрогнозировать ресурс детали при различных условиях эксплуатации, в частности, при циклических нагружениях.

Установлены корреляционные связи между параметрами состояния поверхностного слоя при алмазном выглаживании, получены эмпирические зависимости влияния режимов алмазного выглаживания на предел усталости деталей класса валов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Унксов, Е. П.** Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е.П. Унксова; А.Г. Овчинникова. – Москва : Машиностроение, 1983, - 598 с.
2. **Встовский, Г. В.** Описание эволюции структуры металлической поверхности при механической обработке с использованием метода мультифрактального анализа / Г. В. Встовский, С. А. Колмаков, В. Д. Терентьев // *Материаловедение*. - 1998. - №2. - С. 19-24.
3. **Миллер, К. Ж.** Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее / К. Ж. Миллер // *Заводская лаборатория*. - 1994. - №3. - С. 31-44.
4. **Горицкий В. М.** Структура и усталостное разрушение металлов / В. М. Горицкий, В. Ф. Терентьев. – Москва : Металлургия, 1980. – 208 с.
5. **Хериберг Р. В.** Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Пер. с англ. / Под ред. М. Л. Берштейна, С. П. Ефименко. – Москва: Металлургия. – 1989. – 576 с.
6. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 208 с.
7. **Totay, A. V.** Integral criterion of the state of physical parameters of the surface layer of machine parts / A. V. Totay, M. N. Nagorkin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. - vol. 1061. – 012040. - doi:10.1088/1757-899X/1061/1/012040.
8. **Новиков, И. И.** Микромеханизмы разрушения металлов / И. И. Новиков, В. А. Ермишкин. – Москва : Наука, 1991. – 368 с.
9. **Терентьев, В. Ф.** Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кораблева. – Москва : Наука, 2015. – 484 с.
10. **Щипачев, А. М.** Определение передела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя / А. М. Щипачев, В. С. Мухин // *Авиационная техника*. – 1999. - №3. – С. 23-25.
11. **Тотай, А. В.** Аналитический подход к технологическому обеспечению предела усталости / А. В. Тотай // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. - №3. – С. 13-20.
12. **Курдюмов, В. И.** Проектирование оптимального инструментального оснащения шлифовальных операций / В. И. Курдюмов // *Станки и инструменты*. – 2018. - №1. – С. 23-29.
1. **Unksov, E.P.** Theory of plastic deformations of metals / E.P. Unksov, U. Johnson, V.L. Kolmogorov. Edited by E.P. Unksov; A.G. Ovchinnikov. – Moscow : Mashinostroenie, 1983, - 598 p.
2. **Vstovskiy, G.V.** Description of metal surface structure evolution during machining using the method of multifractal analysis / G.V. Vstovskiy, S.A. Kolmakov, V.D. Terentyev // *Materialovedenie*. - 1998. – no.2. - pp. 19-24.

3. **Miller, K.Zh.** Metal Fatigue - Past, Present and Future / K.Zh. Miller // Zavodskaya Laboratoriya. - 1994. - no.3. - pp. 31-44.
4. **Goritskiy, V.M.** Structure and fatigue failure of metals / V.M. Goritskiy, V.F. Terentyev. - Moscow : Metallurgiya, 1980. - 208 p.
5. **Kherberts, R.V.** Deformation and fracture mechanics of structural materials / edited by M.L. Bershtein, S.P. Efimenko. - Moscow: Metallurgiya. - 1989. - 576 p.
6. **Suslov, A.G.** Technological support of parameters of the parts surface layer / A.G. Suslov. - Moscow : Mashinostorenie, 1987. - 208 p.
7. **Totay, A. V.** Integral criterion of the state of physical parameters of the surface layer of machine parts / A. V. Totay, M. N. Nagorkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021. - vol. 1061. - 012040. - doi:10.1088/1757-899X/1061/1/01204.
8. **Novikov, I.I.** Micromechanisms of metal destruction / I.I. Novikov, V.A. Ermishkin. - Moscow : Nauka, 1991. - 368 p.
9. **Terentyev, V.F.** Fatigue of Metals / V.F. Terentyev, S.A. Korableva. - Moscow : Nauka, 2015. - 484 p.
10. **Shchipachev, A.M.** Determination of the endurance limit taking into account the quality parameters of the surface layer / A.M. Shchipachev, V.S. Mikhin // Aviation Technics. - 1999. - no.3. - pp. 23-25.
11. **Totay, A. V.** Analytical approach to technological support fatigue limit / A.V. Totay // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2019. - no.3. - pp. 13-20.
12. **Kurdyumov, V.I.** Designing the optimal tool equipment for grinding operations / V.I. Kurdyumov // Stanki I Instrumenti. - 2018. - no.1. - pp. 23-29.

Ссылка для цитирования:

Тотай, А.В. Комплексный анализ состояния поверхностного слоя деталей после алмазного выглаживания / А.В. Тотай // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2021. - № 12. - С. 49 - 54. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-12-37-47.

*Статья поступила в редакцию 20.07.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета
Соловьев Д.Л.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 29.11.21.*

Сведения об авторах:

Тотай Анатолий Васильевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического универ-

ситета, тел.: 58-82-05; 8-910-743-51-85, e-mail: totai_av@mail.ru.

Totai Anatoliy Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technosphere

Safety at Bryansk State Technical University, phones: 58-82-05; 8-910-743-51-85, e-mail: totai_av@mail.ru.