

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
3. Розенберг О.А., Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е. Технологическая механика деформирующего протягивания. – Воронеж: ВГТА, 2001. – 203 с.
4. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – М.-Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
5. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных заготовках с большими натягами // Современные проблемы в технологии машиностроения: Сб. трудов Всерос. научно-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 164–167.

Поступила 20.01.2011 г.

УДК 621.9.02

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОВЕРШИННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СО СМАЗОЧНЫМИ МИКРОКАРМАНАМИ ПРИ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ

В.П. Кузнецов, О.В. Дмитриева

Курганский государственный университет
E-mail: wpkuzn@mail.ru; dmitrieva_o_v@mail.ru

Рассмотрены вопросы формирования микро рельефа поверхностей трения высокоточных деталей с повышенными эксплуатационными свойствами при многопереходной финишной обработке на токарно-фрезерных центрах. На основе моделирования режимов деформирующего профилирования установлены закономерности управления объемом получаемых смазочных микрокарманов

Ключевые слова:

Плосковершинный микро рельеф поверхности, смазочные микрокарманы.

Key words:

Flat-topped micro relief surface, oil micropockets.

Формирование микропрофиля поверхности трения высокоточной детали на стадии изготовления определяется способом, режимами механической обработки и микрогеометрическими параметрами инструмента. Проведенные исследования [1, 2] доказали, что увеличение маслосъемности от 0,081 до 1,28 мкм³/мкм² позволяет на порядок увеличить износостойкость поверхности. Абразивный износ поверхности зависит как от относительной площади микроканалов на обрабатываемой поверхности, которая может составлять 28...43 % в зависимости от условий нагружения трибосопряжения, так и от формы их профиля. Оптимальным с точки зрения обеспечения условий трения является плосковершинный микропрофиль поверхностей трения, состоящий из чередующихся относительно глубоких впадин (смазочных микрокарманов) и плоских выступов (плато), позволяющий повысить сопротивление абразивному износу в 1,4...1,6 раза [1].

Для обеспечения плосковершинного микро рельефа поверхности заготовки со смазочными микрокарманами разработаны способ и технология многопереходной обработки поверхностей трения [3, 4]. Разработанная технология реализована применительно к обработке типовой детали «коленчатый вал компрессора» (сталь 40Х, HRC 54...56) и базируется на последовательности взаимосвя-

занных переходов многоцелевой обработки поверхностей трения высокоточных деталей на токарно-фрезерных центрах:

1. Предварительное формирование микропрофиля поверхности трения высокоточной детали чистовым точением и выравнивающим выглаживанием (*smoothing burnishing*).
2. Деформирующее профилирование смазочных микрокарманов на поверхности трения мультинденторным инструментом.
3. Формирование плосковершинного микропрофиля поверхности со смазочными микрокарманами финишным полирующим выглаживанием (*polish burnishing*).

Максимальная высота профиля $R_{\max}$ поверхности для нанесения смазочных микрокарманов должна быть на порядок меньше их рекомендуемой [1] глубины 3...6 мкм, т. е. $R_{\max} < 0,1H$, где H – глубина смазочных микрокарманов. Шероховатость поверхности трения, получаемая в результате чистового точения (подача $S=0,1$ мм/об, скорость $v=100$ м/мин) $R_{\max}=4,5$ мкм, что соизмеримо с рекомендуемой глубиной наносимых смазочных микрокарманов (рис. 1, а). Следовательно, для формирования поверхности трения необходимо предварительное выравнивающее выглаживание. Увеличивая силу выглаживания до уровня, обеспечи-

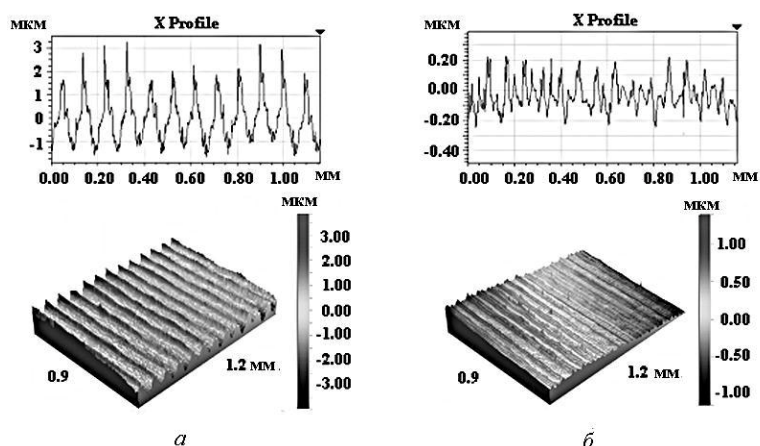


Рис. 1. 2D-профилограммы и 3D-топография поверхности трения детали: а) после точения; б) предварительного выглаживания

вающего глубину внедрения индентора $h_y = 1,1R_{\max}$ с одновременным уменьшением подачи и радиуса индентора инструмента, можно обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхности. Это подтверждается 2D-профилограммами и 3D-топографией (рис. 1, б), полученными с помощью оптического 3D-профилометра WYKO NT1100.

На следующем финишном переходе многоцелевой обработки специальным инструментом [5] профилируют смазочные микрокарманы (рис. 2). Инструмент представляет собой мультиинденторный формирователь смазочных микрокарманов (МФСМ) и состоит из корпуса и закрепленной в нем поворотной державки со вставкой из хон-бруска. При взаимодействии элементов рабочей поверхности МФСМ (зерна хон-бруска) с обрабатываемой поверхностью на поверхности детали формируются микроканавки. Профиль рабочей поверхности хон-бруска МФСМ выполнен в соответствии с формой обрабатываемой поверхности и имеет возможность самоориентации относительно поверхности обрабатываемой детали. Количество микроканавок и их глубина зависят от размеров и зернистости хон-бруска, а также от нормальной составляющей силы профилирования, которая регулируется встроенной пружиной.

Модель внедрения единичного зерна в деформируемый материал детали представляется в виде взаимодействия жесткого сферического выступа, имеющего округленную вершину радиусом ρ , с поверхностью детали (рис. 3). Внедрение алмазно-абразивного зерна в поверхностный слой происходит под действием силы профилирования P , которую можно представить в виде суммы двух сил: P_y – нормальной, которая определяет силу прижатия зерна к поверхности детали (задается пружиной МФСМ), и P_z – тангенциальной, характеризующей усилие, затрачиваемое на перемещение зерна по поверхности детали:

$$P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2} = \sqrt{P_y^2 + (\mu P_y)^2},$$

где μ – коэффициент трения-царапания контактирующих поверхностей, определяемый экспериментально.

Глубина внедрения зерна h в поверхностный слой детали в зависимости от силы P и свойств поверхностного слоя может быть описана как:

$$h = \frac{P}{\pi r c \sigma_T} = \frac{\sqrt{P_y^2 + P_z^2}}{\pi r c \sigma_T} = \frac{\sqrt{P_y^2 + (\mu_0 P_y)^2 + (\mu_m P)^2}}{\pi r c \sigma_T}, \quad (1)$$

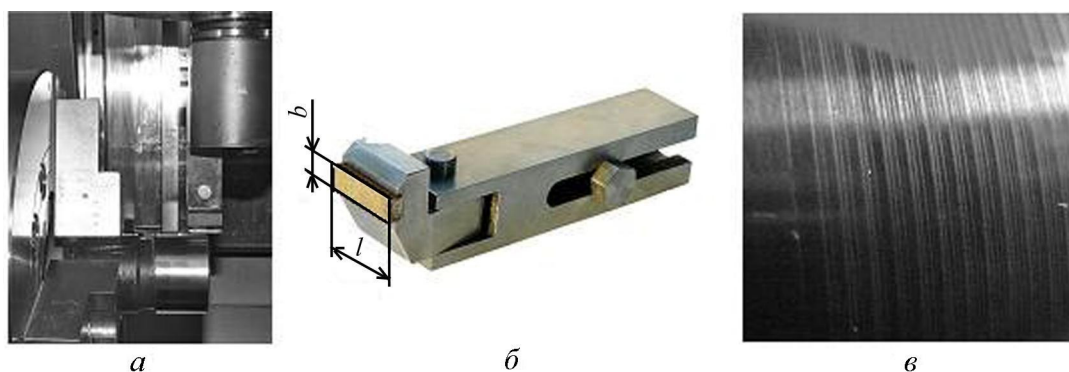


Рис. 2. Формирование смазочных микрокарманов винтового типа мультиинденторным инструментом: а) обработка тестовой детали; б) мультиинденторный формирователь смазочных микрокарманов; в) фрагмент поверхности тестовой детали после обработки

где σ_T – предел текучести материала; c – коэффициент стеснения; μ_0 и μ_m – соответственно коэффициенты трения-царапания при перемещении инструмента в осевом и окружном направлении.

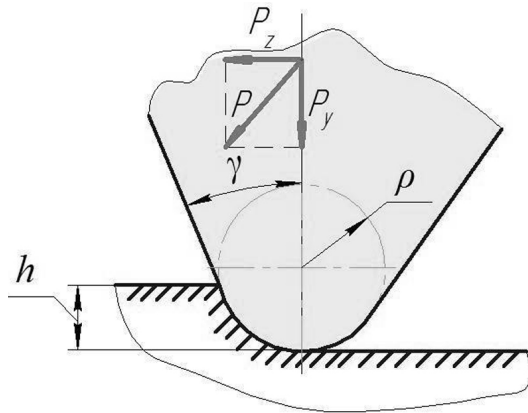


Рис. 3. Схема силового взаимодействия единичного зерна хон-бруска мультиинденторного инструмента с обрабатываемой поверхностью: h – глубина внедрения; ρ – радиус округления режущего элемента зерна

Для определения зернистости хон-брусков z , применяемых для профилирующей обработки смазочных микрокарманов, предложена следующая формула:

$$z = K_1 K_2 \frac{\left(1 - \frac{S_{пв}}{100}\right) H}{2}, \quad (2)$$

где K_1 – расчетный коэффициент площади притупленных выступов, зависящий от $S_{пв}$; K_2 – экспериментальный коэффициент, зависящий от механических свойств обрабатываемого материала; $S_{пв}$ – плосковершинность поверхности, определяемая относительной площадью притупленных выступов, %; H – глубина рисок-царапин, мкм.

По данным исследований [6] наилучшие свойства при трении обеспечивают поверхности, у которых относительная площадь канавок микрорельефа составляет примерно 25 %. Следовательно, $S_{пв}$ должна быть не менее 75 %. На основании зависимости (2) для различных глубин рисок-царапин при $K_1=120$; $K_2=1,7$ [7] установлены значения зернистости хон-брусков, пригодных для формирования микрорельефа.

Например, для получения микрорельефа со смазочными микрокарманами при скорости вращения детали $v_0=40$ м/мин; скорости возвратно-поступательного движения $v_{вп}=15$ м/мин; давлении $P=0,8$ МПа пригодны бруски средней зернистости от 100/80 до 250/200 (табл. 1).

На основании зависимости (1), учитывая, что глубина полученной царапины H для брусков средней и крупной зернистостей $H \approx 0,5h$ [7], сила прижатия зерна к поверхности детали равна

$$P_y = \frac{2H\pi r c \sigma_T}{\sqrt{1 + \mu_o^2 + \mu_m^2}}.$$

Таблица 1. Значения зернистости рабочей части деформирующего инструмента для формирования заданной глубины смазочных микрокарманов

H , мкм	z , мкм	Зернистость хон-бруска
4	102	100/80
6	153	163/125
8	204	200/163
10	255	250/200

Нормальная составляющая силы профилирования смазочных микрокарманов рабочими зернами хон-бруска инструмента может быть определена следующей зависимостью:

$$P_{\Sigma y} = N \frac{2H\pi r c \sigma_T}{\sqrt{1 + \mu_o^2 + \mu_m^2}} l b k, \quad (3)$$

где l и b – длина и ширина контактной поверхности инструмента, м; N – количество алмазных зерен, приходящихся на 1 м² рабочей поверхности; k_x – коэффициент, учитывающий влияние концентрации алмазов в брусках.

На основании зависимости (3) были определены глубины рисок H при профилировании смазочных микрокарманов инструментом с хон-бруском 163/125. Значения силы профилирования варьировались в пределах от 40 до 140 Н. Изменение глубины смазочных микрокарманов (рисок-царапин) в зависимости от силы профилирования при различных значениях ширины рабочей части инструмента b представлено на рис. 4.

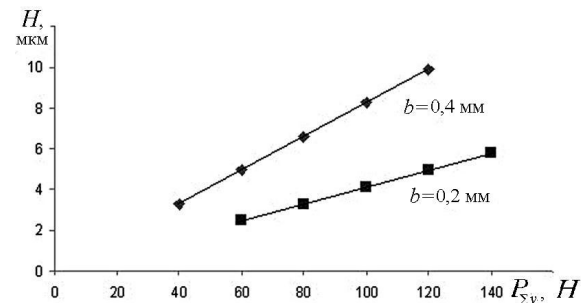


Рис. 4. Изменение глубины смазочных микрокарманов в зависимости от силы профилирования $P_{\Sigma y}$

В результате профилирующей обработки получен микрорельеф, который представлен 2D-профилограммой и 3D-топографией поверхности (рис. 5). Образовавшиеся канавки микрорельефа имеют края в виде выступов с высотой, соизмеримой с величиной $R_{\max}$ микропрофиля обрабатываемой поверхности.

На основании анализа 2D-профилограммы (а) и 3D-топографии (б) поверхности (рис. 5) можно сделать вывод о необходимости финишного перехода многоцелевой обработки полирующим выглаживанием для увеличения $S_{пв}$ до 75 % за счет уменьшения шероховатости несущей поверхности.

В процессе выглаживания полирующим выглаживателем [8] на поверхности детали формируются опорные площадки, при этом сохраняется микрорельеф масляных карманов, созданный на предыдущем переходе (рис. 6).

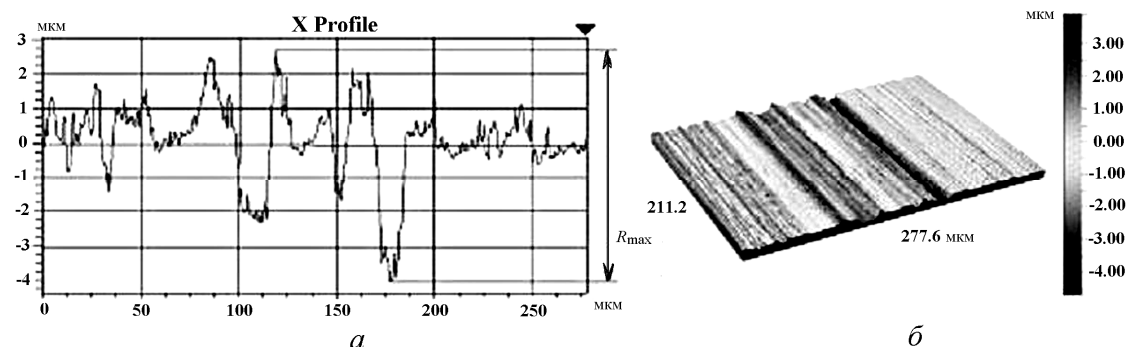


Рис. 5. 2D-профилограмма (а) и 3D-топография (б) поверхности детали после деформационного профилирования смазочных микрокарманов

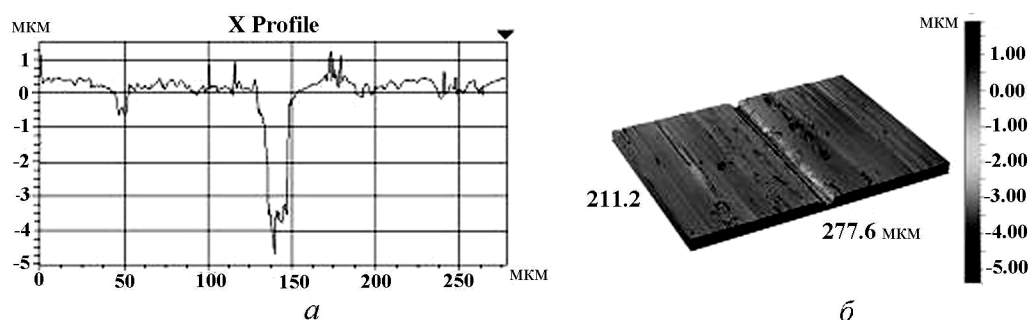


Рис. 6. 2D-профилограмма (а) и 3D-топография (б) поверхности детали с плосковершинным микропрофилем и смазочными микрокарманами после полирующего выглаживания

Сформированный на финишных переходах микрорельеф сохраняет геометрическую и размерную точность детали, полученные на предыдущих переходах многопереходной обработки на высокоточном станке.

Результаты исследования фактической маслосмкости поверхности после каждого из финишных переходов многоцелевой обработки, проведенные с помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan MIRA 3 LMU, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Объем смазочных микрокарманов

Обработка	Средний объем смазочных микрокарманов	
	Абсолютное значение, мкм ³	Удельный объем, мкм ³ /мкм ²
Точение	207299,6	1,433
Предварительное выглаживание	43192,6	0,818
Деформирующее профилирование	357684,2	2,473
Финишное выглаживание	188685,4	1,305

Для определения объема формируемых смазочными микрокарманами используется схема взаимодействия единичного зерна с обрабатываемой поверхностью (рис. 3). Профиль смазочных микрокарманов, получаемых в результате взаимодействия единичного зерна с обрабатываемой поверхностью, представляет собой сегмент круга. В связи

с этим для расчета маслосмкости принимается следующая зависимость:

$$V = \frac{2 \left(1 - \frac{S_{\text{пв}}}{100} \right) H}{3},$$

где V – маслосмкость поверхности, мкм³/мкм²; $S_{\text{пв}}$ – плосковершинность поверхности, %; H – глубина рисок-царапин, мкм.

Маслосмкость поверхности V , рассчитанная по формуле (4) для различных значений плосковершинности обработанной поверхности $S_{\text{пв}}$, представлена на рис. 7.

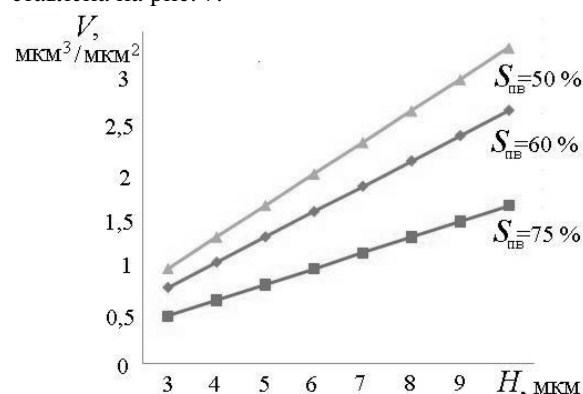


Рис. 7. Зависимость объема смазочных микрокарманов от их глубины при различной плосковершинности поверхности

Значения фактической маслосмкости (табл. 2), полученные при исследовании тестовой детали,

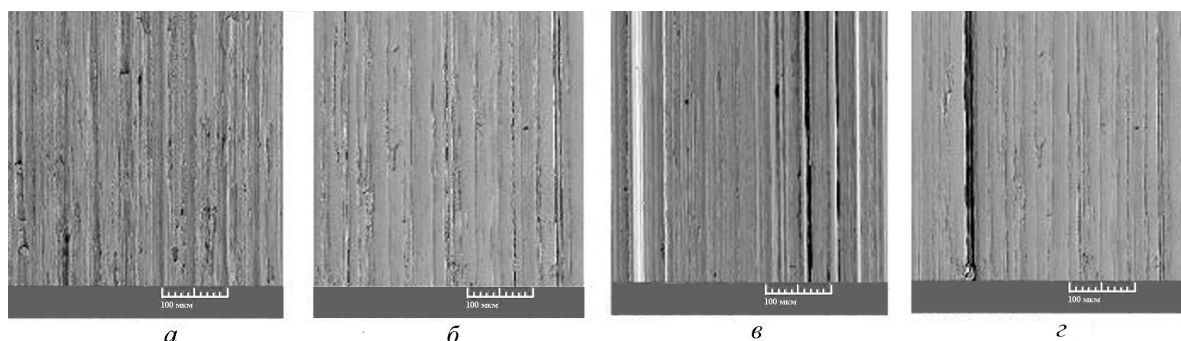


Рис. 8. Морфология поверхности после финишных переходов многоцелевой обработки: а) чистовое точение; б) выравнивающее выглаживание; в) деформирующее профилирование смазочных микрокарманов; г) полирующее выглаживание.

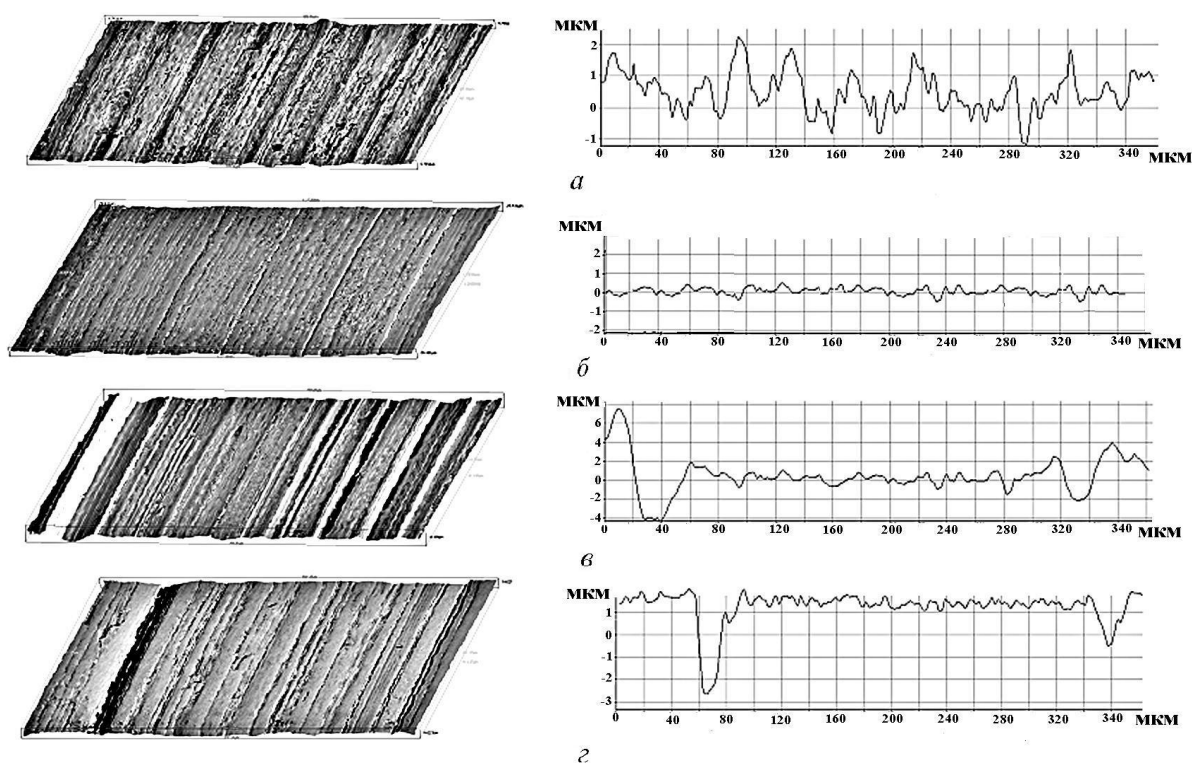


Рис. 9. Объемные изображения и профилограммы участков поверхности после финишных переходов многоцелевой обработки: а) чистовое точение; б) выравнивающее выглаживание; в) деформирующее профилирование смазочных микрокарманов; г) полирующее выглаживание

показали, что объем смазочных микрокарманов соответствует расчетному при средней глубине смазочных микрокарманов 4 мкм и плосковершинности поверхности 50 %. Полученная плосковершинность поверхности трения обусловлена большой шероховатостью на плато. При уменьшении шероховатости плато расчетные значения и экспериментальные данные будут близки, что отражает адекватность принятой модели формирования микрорельефа плосковершинной поверхности со смазочными микрокарманами.

Плоское и объемное изображения и профилограммы участков поверхности после переходов финишной обработки, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan MIRA

3 LMU, подтверждают создание плосковершинной поверхности со смазочными микрокарманами и повышенными эксплуатационными свойствами (рис. 8, 9).

Относительная опорная длина плосковершинного профиля сформированного микрорельефа достигает значения $t_{50}=80...85\%$, глубина полученных смазочных микрокарманов 3,5...4 мкм, шероховатость поверхности плато $Ra \leq 0,05$ мкм

Выводы

Разработана математическая модель формирования смазочных микрокарманов при многопереходной финишной обработке высокоточных поверхностей деталей на токарно-фрезерных центрах. Получены зависимости, позволяющие выби-

рять зернистость материала хон-бруска, определять силу профилирования и рассчитывать величину маслосъемности плосковершинной поверхности со смазочными микрокарманами.

Для решения контактной задачи формирования смазочных микрокарманов мультиинденторным инструментом принята сферическая модель формы профилирующего зерна.

Определена зависимость объема смазочных микрокарманов от их глубины при различной плосковершинности поверхности трения.

На основании исследования фактической маслосъемности поверхности тестовой детали с помощью электронного сканирующего микроскопа Tescan MIRA 3 LMU доказана адекватность принятой модели формирования смазочных микрокарманов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеповецкий И.Х., Ющенко С.А., Бараболя А.В. и др. Трибология формирования поверхностей. — Киев: Наукова думка, 1989. — 232 с.
2. Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки. — М.: Металлургия, 1991. — 479 с.
3. Способ формирования плосковершинного регулярного микрорельефа выглаживанием: пат. 2401731 Рос. Федерация. № 2008127351; заявл. 04.07.08; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29. — 4 с.
4. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Дмитриева О.В. Инженерия плосковершинного регулярного микрорельефа поверхности при многоцелевой обработке деталей // Вестник УГАТУ. — 2009. — № 4 (33). — С. 113–115.
5. Мультиинденторный деформирующий формирователь смазочных микрокарманов: пат. 91307 Рос. Федерация. № 2009139472; заявл. 26.10.09; опубл. 10.02.10, Бюл. № 4. — 2 с.
6. Costa H.L., Hutchings I.M. Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing // Journal of Materials Processing Technology. — 2009. — № 209. — С. 1175–1180.
7. Чеповецкий И.Х. Основы финишной алмазной обработки. — Киев: Наукова думка, 1980. — 468 с.
8. Полирующий выглаживатель: пат. 70176 Рос. Федерация. № 2007133886, заявл. 10.09.07; опубл. 20.01.08. — Бюл. № 2. — 4 с.

Поступила 10.03.2011 г.

УДК 621.787.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРОШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ НА ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНЫХ ЦЕНТРАХ

В.П. Кузнецов, О.В. Дмитриева, А.В. Макаров*, А.Е. Киряков

Курганский государственный университет
*Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург
E-mail: wpkuzn@mail.ru

Исследовано формирование субмикрошероховатого профиля поверхностей деталей из коррозионностойкой стали в различных структурных состояниях при финишной обработке выглаживанием инструментом с упругим демпфером на токарно-фрезерных центрах. Предложена математическая модель силы выглаживания, назначаемой для формирования субмикрошероховатого профиля обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова:

Выглаживание, сила выглаживания, шероховатость поверхности.

Key words:

Burnishing, burnishing force, surface roughness.

Применение в высокотехнологичном машиностроении прецизионных токарно-фрезерных центров с ЧПУ позволяет изготавливать сложные и ответственные детали за один установ, эффективно сочетая различные виды механической обработки с финишной обработкой поверхностей выглаживанием [1]. Однако практика выглаживания функциональных поверхностей деталей на многоцелевых станках инструментом с упругим демпфером показала, что выработанные практические рекомендации по режимам обработки [2] не позволяют эффективно управлять качеством поверхностей деталей из коррозионностойких сталей.

Одной из основных проблем при формировании выглаживанием субмикрошероховатых поверхностей деталей со средним арифметическим отклонением профиля $Ra < 100$ нм является обоснованное назначение усилия обработки. Существующие расчетные зависимости силы выглаживания основаны, как правило, на закономерностях, полученных при статическом вдавливании индентора в поверхность заготовки, и не учитывают комплексное влияние шероховатости обрабатываемой поверхности и подачи [3–5].

Целью экспериментальных исследований являлось выявление закономерностей формирования