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

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чеповецкий И.Х., Ющенко С.А., Бараболя А.В. и др. Триботехнология формирования поверхностей. – Киев: Наукова думка, 1989. – 232 с.
- Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки. – М.: Металлургия, 1991. – 479 с.
- Способ формирования плосковершинного регулярного микрорельефа выглаживанием: пат. 2401731 Рос. Федерация. № 2008127351; заявл. 04.07.08; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29. – 4 с.
- 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.

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

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

- Мультиинденторный деформирующий формирователь смазочных микрокарманов: пат. 91307 Рос. Федерация. № 2009139472; заявл. 26.10.09; опубл.10.02.10, Бюл. № 4. – 2 с.
- Costa H.L., Hutchings I.M. Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – № 209. – C. 1175–1180.
- Чеповецкий И.Х. Основы финишной алмазной обработки. Киев: Наукова думка, 1980. – 468 с.
- 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 профиля поверхностей деталей выглаживанием при типовых режимах обработки, примененных к различным структурным состояниях материала заготовки. Теоретические исследования были направлены на построение аналитической модели силы выглаживания с учетом свойств обрабатываемого материала, геометрии индентора, параметров шероховатости поверхности заготовки, а также особенностей динамики формирования профиля поверхности в направлении подачи инструмента.

Для проведения экспериментов была выбрана нержавеющая сталь мартенситного класса 20X13. Исследования проводились на плоских образцах диаметром 75 мм, на поверхности которых выглаживали кольцевидные участки шириной 10 мм. Схема обработки исключала влияние нежесткости заготовки и ее крепления на профиль обработанной поверхности.

С целью изучения формирования профиля поверхности при различных структурных состояниях обрабатываемого материала образцы были разделены на три группы (по 5 образцов в каждой группе), после чего образцы двух групп подверглись термообработке с различными температурами отпуска. Твердость образцов в группах после термообработки приведена в табл. 1.

Таблица 1. Твердость образцов в группах после термообработки

Номер	Условия тери	иообработки	Твердость образцов	
группы	Закалка, °С	Отпуск, °С	после термообработки	
1	-	-	150 HB	
2	1050	560	270 HB	
3	1050	150	460 HB	

Чистовое точение плоских поверхностей образцов осуществлялось твердосплавной пластиной IC907 (VNMG12T304-NF) фирмы ISCAR при скорости V=100 м/мин и подаче S=0,1 мм/об на токарно-фрезерном центре Multus B300 японской фирмы OKUMA. Среднее арифметическое отклонение профиля после чистового точения составило Ra=0,8...1,18 мкм.

Выглаживание выполнялось инструментом с узлом динамической стабилизации, различные конструкции которого защищены патентами РФ [6]. В качестве рабочей части инструмента ис-

пользовался сферический алмазный индентор с радиусом заточки R=4 мм. Технологические режимы выглаживания назначались согласно типовым рекомендациям для исследуемого типа сталей [2]: сила P=230 H, подача S=0,08 мм/об, скорость V=100 м/мин. Рабочая зона охлаждалась смазочно-охлаждающей жидкостью фирмы Rhenus.

Исследование топографии образцов при помощи оптического 3D-профилометра WYKO NT1100 показало, что, в зависимости от структурного состояния обрабатываемого материала, при одних и тех же режимах чистового точения и выглаживания получено три принципиально различных варианта поверхности (рис. 1).

На образцах первой группы сформирован новый рельеф поверхности с шагом между неровностями, равным величине подачи при выглаживании (рис. 2). Среднее арифметическое отклонение профиля выглаженной поверхности после переходного участка внедрения составило Ra=0,15 мкм. Фактическое внедрение индентора в обрабатываемую поверхность при выглаживании в несколько раз превышало наибольшую высоту неровностей профиля поверхности после чистового точения  $R_{\rm max}$ , что привело к размерным изменениям и дополнительным искажениям профиля поверхности на участках входа и выхода индентора. Во внеконтактной зоне деформации происходило поднятие уровня вершин и впадин неровностей обрабатываемой поверхности, вследствие чего в направлении подачи формировался боковой наплыв оттесненного металла высотой  $h_{\mu}$  и шириной  $b_{\mu}$  (рис. 2,  $\delta$ ).

На образцах второй группы сформирован новый рельеф поверхности с шагом между неровностями, равным величине подачи при выглаживании (рис. 3). Среднее арифметическое отклонение профиля на выглаженном участке поверхности после переходного участка внедрения составило Ra=0,11 мкм. В отличие от образцов первой группы, фактическое внедрение индентора в обрабатываемую поверхность незначительно превышало  $R_{max}$ поверхности после точения. Боковой наплыв оттесненного металла формировался, главным образом, за счет повышения уровня впадин обрабатываемой поверхности.

На образцах третьей группы сформирован плосковершинный рельеф с частично деформированными вершинами неровностей и оставшимися



Рис. 1. 3D-топография поверхностей образцов группы 1 (а), группы 2 (б) и группы 3 (в) на участках перехода от точения к выглаживанию



Рис. 2. Профилограммы начального (а) и конечного (б) участков выглаженной поверхности образца группы 1



Рис. 3. Профилограммы начального (а) и конечного (б) участков выглаженной поверхности образца группы 2

от точения впадинами (рис. 4). Шаг неровностей профиля на выглаженном участке равен величине подачи при чистовом точении. Среднее арифметическое отклонение профиля на выглаженном участке составило Ra=0,24 мкм. При выглаживании образцов третьей группы боковой наплыв практически отсутствовал.

Параметры шероховатости точеных и выглаженных поверхностей, определенные при помощи оптического 3D профилометра WYKO NT1100, а также значения микротвердости  $HV_{0,2}$ , полученные исследованием образцов на микротвердомере Leica при максимальной нагрузке 2 H, приведены в табл. 2.

Из приведенных данных следует, что субмикрошероховатый профиль сформирован только на образцах первой и второй групп при глубине внедрения индентора, превышающей значение  $R_{\text{max}}$  обрабатываемой поверхности.

Принято считать, что при выглаживании закаленных сталей с оптимальными режимами шероховатость обрабатываемой поверхности (Ra=0,08...1,25 мкм) снижается в 4...5 раз. Эксперимент показал, что выглаживание поверхностей деталей на прецизионном токарно-фрезерном центре позволяет уменьшить среднее арифметическое отклонение профиля в 7...10,5 раз.

Таблица 2. Параметры шероховатости поверхности и микротвердость образцов

Номер группы	Характеристики поверхностного слоя						
	После чистового точения			После выглаживания			
	<i>R</i> <sub>max</sub> , мкм	<i>Ra</i> , мкм	HV <sub>0,2</sub>	<i>R</i> <sub>max</sub> , мкм	<i>Ra</i> , мкм	$HV_{0,2}$	
1	4,88	1,18	274	0,62	0,15	307	
2	3,75	1,15	334	0,48	0,11	388	
3	3,23	0,8	587	1,25	0,24	640	

На образцах второй группы дополнительно исследовалось влияние подачи на глубину внедрения индентора. На рис. 5 приведены профилограмма и 3D-топография поверхности образца на участке



Рис. 4. Профилограммы начального (а) и конечного (б) участков выглаженной поверхности образца группы 3

-1.5

n'n

Точение

0.60

0.80 1.00

а

0.40

1.5 1.0 0.5 -0.5



Рис. 5. Профилограмма и 3D-топография образца группы 2 на участке перехода от выглаживания к точению

перехода от выглаживания к точению. Выглаживание осуществлялось при скорости подачи S=0,02 мм/об. Уменьшение подачи с 0,08 мм/об до 0,02 мм/об при неизменных параметрах радиуса заточки индентора R=4 мм, силы выглаживания P=230 Н и скорости V=100 м/мин привело к значительному увеличению глубины внедрения индентора в обрабатываемую поверхность и формированию бокового наплыва высотой  $h_n=6,5$  мкм. При выключении подачи произошло дополнительное перезаглубение индентора инструмента на величину  $\Delta y_n=6$  мкм.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что в общем случае глубина внедрения индентора при формировании профиля выглаженной поверхности может быть задана как:

$$y_{\theta} = k_n R_{\max}, \tag{1}$$

где *k*<sub>n</sub> – коэффициент профилирования.

Минимальные значения *Ra* выглаженных поверхностей достигаются при коэффициенте профилирования  $k_n$ =1,1...1,3. Увеличение коэффициента профилирования до  $k_n$ =1,3...1,5 приводит к ухудшению параметров шероховатости вследствие дополнительных деформационных искажений, связанных с обратным пластическим течением металла. При  $k_n$ =0,5...1,1 новый субмикрошероховатый профиль не формируется, так как неровности обрабатываемой поверхности подвергаются не полному, а частичному деформированию.

Экспериментально установлено, что при внедрении индентора выглаживающего инструмента на глубину, превышающую  $R_{\text{max}}$  поверхности после чистового точения, начинается оттеснение пластически деформированного металла в направлении подачи с образованием бокового наплыва высотой  $h_u$  и шириной  $b_u$ .

Выполненные исследования позволили определить подходы к разработке аналитической модели силы выглаживания, в основу которой положен принцип профилирования обрабатываемой поверхности с учетом динамического внедрения индентора инструмента в поверхность заготовки и образования бокового наплыва. Модель силы выглаживания может быть построена на основе статической модели вдавливания индентора в плоскую поверхность с учетом поправочного коэффициента *K*:

$$P_{e} = K P_{cm}, \qquad (2)$$

где *P<sub>cm</sub>* – сила статического вдавливания индентора в неподвижную плоскую поверхность.

Поправочный коэффициент силы выглаживания должен учитывать изменение площади пятна контакта вследствие динамического изменения высоты бокового наплыва  $h_n$  и шероховатость обрабатываемой поверхности:

$$K=f(h_{H},R_{\max}).$$

Расчетные схемы статического и динамического внедрения индентора на глубину соответственно  $y_{cm}$  и  $y_{s}$  приведены на рис. 6.

Для статического вдавливания сферического индентора в плоскую поверхность неподвижной заготовки на глубину *y*<sub>ст</sub> необходимо приложить силу

$$P_{cm} = 2\pi R y_{cm} \text{HB}, \qquad (3)$$

где HB – твердость материала заготовки по Бринеллю.

Динамическое контактное взаимодействие индентора инструмента с поверхностью заготовки при выглаживании отличается от статического наличием вращательного движения заготовки со скоростью  $\omega$  и осевого смещения индентора в направлении подачи *S* с шагом  $t_s$ . Одновременное перемещение индентора и обрабатываемой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях приводит к динамическому изменению площади контакта за счет постепенного формирования бокового наплыва.

Расчетная схема зоны контакта сферического индентора с поверхностью бокового наплыва при выглаживании приведена на рис. 7.

Дуга контакта индентора с боковым наплывом в плоскости пятна контакта ограничена центральным углом  $\varphi_s$ , величина которого пропорциональна шагу подачи  $t_s$ . Учитывая, что контактные углы  $\varphi_n$  и  $\varphi_s$  менее 5°, границы бокового наплыва можно аппроксимировать прямыми линиями. Тогда объем наплыва, примыкающего к индентору, можно вычислить как:

$$V_{\mu} \cong \frac{1}{2} b_{\mu} h_{\mu} \varphi_{s} R_{\mu}.$$

Отсюда, высота бокового наплыва

$$h_{\mu} = \frac{2V_{\mu}}{b_{\mu}R_{\mu}\varphi_{s}}.$$
(4)



Рис. 6. Расчетная схема статического (а) и динамического (б) внедрения индентора в обрабатываемую поверхность: 1) индентор; 2) обрабатываемая поверхность; а – длина большой полуоси пятна контакта; t₅ – шаг подачи; ω – угловая скорость вращения заготовки



Рис. 7. Расчетная схема контактной зоны: φ<sub>s</sub> − угол контактной зоны в плоскости пятна контакта; І<sub>n</sub> − длина бокового наплыва; φ<sub>n</sub> − угол контактной зоны в плоскости, нормальной пятну контакта; R<sub>n</sub> − расстояние от центра пятна контакта до линии проекции вершины бокового наплыва

Приняв допущение, что объем бокового наплыва  $V_n$  при заданных значениях  $P_e$ , НВ и R является величиной постоянной, можно предположить, что увеличение подачи приведет к увеличению угла  $\varphi_s$ и уменьшению высоты  $h_n$ . Этот вывод согласуется с экспериментальными данными. В соответствии с расчетной схемой, рис. 6, a:

$$\varphi_s = \arccos\left(\frac{a-t_s}{t_s}\right).$$

Из расчетной схемы следует, что длина большой полуоси пятна контакта, мм:

$$a=0,045\sqrt{Ry_{cm}}$$
. (5)

Решая совместно (1) и (5), получаем:

$$a=0,045\sqrt{k_n R R_{\max}}.$$

Подставив значение а в (2), получим:

$$\varphi_s = \arccos\left(1 - \frac{t_s}{0,045\sqrt{k_n R R_{\max}}}\right). \tag{6}$$

Экспериментально установлено, что увеличение высоты бокового наплыва  $h_{\mu}$  при уменьшении шага подачи  $t_s$  по своему воздействию на глубину внедрения индентора идентично увеличению силы выглаживания [7]. Решая совместно (2)–(4) и (6), получаем:

$$P_{s} = k_{M} \text{HB} R R_{\text{max}} \arccos\left(1 - \frac{t_{s}}{0.045\sqrt{k_{n}RR_{\text{max}}}}\right), \quad (7)$$

где  $k_{\rm M}$  — коэффициент, учитывающий упругопластические свойства материала:

$$k_{M} = \frac{b_{H}R_{H}}{2V_{H}}.$$

При твердости материала заготовки менее 350 HB  $k_{\mu}$ =0,05. Для более твердых материалов коэффициент  $k_{\mu}$ =0,06.

Результаты расчетов силы выглаживания  $P_e$ , выполненные по формуле (7) для стали 20X13 в двух структурных состояниях, приведены на рис. 8.

При обработке одного из образцов группы 3 (*R*<sub>max</sub>=3,23 мкм, твердость 460 HB) с силой выгла-



Рис. 8. Зависимость силы выглаживания от подачи для стали 20Х13 в двух структурных состояниях

живания  $P_e$ =340 H, определенной согласно (7) при *R*=4 мм и  $t_s$ =0,08 мм, достигнуто среднее арифметическое отклонение профиля выглаженной поверхности *Ra*=0,09 мкм.

Использование предложенной методики расчета силы выглаживания на ООО «Предприятие «Сенсор», г. Курган при производстве высокоточных деталей типа «шпиндель» для широкой номенклатуры задвижек и клапанов высокого давления на токарно-фрезерных центрах фирм OKUMA и TAKISAWA позволило гарантированно получать уплотнительные поверхности со средним арифметическим отклонением профиля *Ra*=20...90 нм в массовом производстве.

## Выводы

 Экспериментально установлено, что существующие рекомендации и расчетные зависимости не позволяют точно определить силу выглаживания и, соответственно, глубину внедрения индентора, необходимую для формирова-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кузнецов В.П. Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей // Металлообработка. – 2010. – № 1 (55). – С. 7–15.
- Кугультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.Н. Технология обработки конструкционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 672 с.
- Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
- Суслов А.Г., Гуров Р.В., Тишевских Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 9. – С. 20–21.

ния субмикрошероховатого профиля обрабатываемой поверхности.

- Показано, что скорость подачи при выглаживании оказывает существенно влияние на глубину внедрения индентора инструмента в обрабатываемую поверхность.
- Введено понятие коэффициента профилирования выглаживаемой поверхности, задающего отношение глубины внедрения индентора к наибольшей высоте неровностей исходного профиля.
- Разработана математическая модель силы выглаживания, учитывающая подачу, упругопластические свойства материала заготовки и заданный коэффициент профилирования.
- 5. Адекватность модели проверена при назначении режимов выглаживания в серийном производстве деталей типа «шпиндель» из стали 20X13 для задвижек высокого давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 11-08-01025-а.

- Korzynski M. Modeling and experimental validation of the forcesurface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool // Int. J. of Machine Tools & Manufacture. – 2007. – № 47. – P. 1956–1964.
- Выглаживатель: пат. 62554 Рос. Федерация. № 2006132451; заявл. 02.05.07; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. 1 с.
- Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

Поступила 10.04.2011 г.