Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **М. А. Волосова**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

УДК 621.9(031):666.3

СИСТЕМА ЭКСПЛУАТАЦИИ КЕРАМИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ НАРУЖНОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Разработана методика выявления основных закономерностей наружного выглаживания цилиндрической заготовки из стали 40Х с использованием инструмента из Al_2O_3–TiC-керамики. На основании результатов экспериментальных исследований построена система эксплуатации керамического выглаживателя, учитывающая напряженно-деформированное состояние керамики в области контакта с заготовкой.

Ключевые слова: *выглаживание, Al_2O_3–TiC-керамика, поверхностный слой, износ, выкрашивание, микротвердость.*

ВВЕДЕНИЕ

Усовершенствованию технологий управления состоянием поверхностного слоя деталей машин, основанных на разных физико-химических эффектах, традиционно уделяется пристальное внимание [1]. Это связано со значительным влиянием микрорельефа, шероховатости, дефектности, микротвердости и поверхностных остаточных напряжений на эксплуатационные характеристики изготовленных деталей. Создать благоприятное сочетание этих параметров поверхности позволяет операция выглаживания, которая реализуется на завершающей стадии технологического процесса с использованием специального инструмента — выглаживателя [2]. Износостойкость поверхности деталей, изготовленных с применением этой технологии, увеличивается до 50 %, причем наибольший эффект достигается при обработке деталей, работающих при переменных нагрузках [3, 4]. Эффективность применения этой технологической операции зависит от многих факторов, в том числе износостойкости инструментального материала, из которого изготовлен выглаживатель [5]. В настоящее время наибольшее распространение получили алмазные выглаживатели, способные сопротивляться высоким контактным нагрузкам при относительно невысоких скоростях обработки; повышение скоростей обработки негативно влияет на ресурс этого инструмента [6]. Поэтому весьма актуальной задачей становится поиск альтернативных инструментальных материалов, способных вывести операцию выглаживания на качественно новый уровень. Одним из вариантов решения этой задачи является применение инструментов из современной керамики, которые демонстрируют высокие результаты в сравнительных испытаниях [7–9]. Однако отсутствие сведений о специфике эксплуатации керамических выглаживателей не позволяет сформировать рекомендации по их рациональному применению.

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

В работе поставлена цель — с использованием оригинальной методики выявить основные закономерности процесса внешнего выглаживания цилиндрических заготовок при использовании инструмента из Al_2O_3–TiC-керамики и на основе экспериментальных результатов построить систему эксплуатации керамического инструмента при наружном цилиндрическом выглаживании, учитывающую напряженно-деформированное состояние керамики в области контакта с заготовкой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены с использованием методики, адаптированной для достижения сформулированной цели исследования; в качестве прототипов для ее создания использовали методики, приведенные в работах [10–12]. Исследовали процесс выглаживания наружной цилиндрической поверхности заготовок *1* из стали 40Х (220–240 *HB*) на токарном станке (модель CU500MRD) с бесступенчатым регулиро-

ванием скорости вращения шпинделя (рис. 1, *а*). Обрабатывали заготовки диаметром 120 мм (заготовки исключали из экспериментов при уменьшении их диаметра менее 70 мм) и длиной 400 мм с кольцевыми канавками шириной 3 мм, обеспечивающими удобство вырезки образцов для металлографических исследований. Параметр *Ra* шероховатости поверхности заготовки после чистового точения (перед выглаживанием) не превышал 3,2 мкм.

В качестве выглаживателя использовали проходной резец *2* с закрепленной прихватом сверху многогранной пластины *3* формы SNGN 120416 из ВОК71 (Al_2O_3–TiC-керамика). Выглаживание выполняли радиусной поверхностью *4* пластины между главной *5* и вспомогательной *6* поверхностями. Радиус округления радиусной поверхности составлял r = 1,6 мм (рис. 1, *б*). Процесс выглаживания с использованием керамического выглаживателя (КВ) реализовали за счет установки вершины резца выше оси шпинделя станка на величину n = 2,1 мм. Резец, установленный на станке, имел следующую геометрию: главный угол в плане $\varphi = 45^o$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 45^o$, главный задний угол $\alpha = 7^o$ и вспомогательный задний угол $\alpha_1 = 7^o$.

Отбор керамических пластин для экспериментов осуществляли по результатам внешнего осмотра, определения их геометрических размеров и шероховатости поверхностей с учетом рекомендаций [13]. При обнаружении дефектов на радиусных поверхностях КВ инструмент исключали из исследований.

Режимы выглаживания: скорость v = 100, 200 и 300 м/мин, продольная подача S = 0,05, 0,075 и 0,1 мм, глубина t = 0,1, 0,25 и 0,5 мм, число проходов i = 1, 3, 5. Выглаживание проводили без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). После каждого цикла выглаживания, включающего определенное число проходов, с заготовок снимали упрочненный слой обрабатываемого материала (ОМ) посредством чистового точения с глубиной резания 1 мм. Все опыты дублировали 3 раза.

Специфику деформационных процессов в зоне контакта КВ с ОМ изучали на шлифах образцов, вырезанных из заготовки. Места вырезки образцов *8* для металлографических исследований показаны на рис. 1, *а*. Параметры характерных областей деформаций определяли по текстуре ОМ. Шлифы для металлографических исследований изготавливали с использованием пластин из синтетических алмазов марки САМ зернистостью 80/63, 28/20, 7/5 и 3/2 с концентрацией 100 % и связкой МП. Окончательную доводку шлифов выполняли с использованием алмазной пасты АСМ зернистостью 1/0, нанесенной на плотную бумагу. После этого шлифы протравливали раствором азотной кислоты. Металлографические исследования проводили с использованием микроскопа ММР-4. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г.

Геометрические параметры участка износа *7* КВ длиной l и шириной h измеряли через определенное время их эксплуатации с использованием оптического микроскопа SteREO Discovery V12 (Carl Zeiss, Германия), прибора MarSurf XC 20 и профилографа-профилометра Hommel Tester T8000 (JENOPTIK, Германия). Морфологию поверхности участка износа исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH. Эти исследования выполняли после стравливания налипов ОМ с участка износа КВ, что позволило выявить изменение морфологии и структуры керамики, а также проанализировать кинетику развития трещин в ее поверхностном слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что выглаживание с использованием КВ обеспечивает уменьшение исходной шероховатости поверхностей заготовок до Ra = 0,7–1,4 мкм, причем наименьшее значение этого параметра зафиксировано при v = 300 м/мин. При увеличении продольной подачи S от 0,05 до 0,1 мм и глубины t от 0,1 до 0,5 мм параметр Ra после выглаживания повышается. Шероховатость поверхности также зависит от числа проходов i; наибольший эффект достигается после перво-

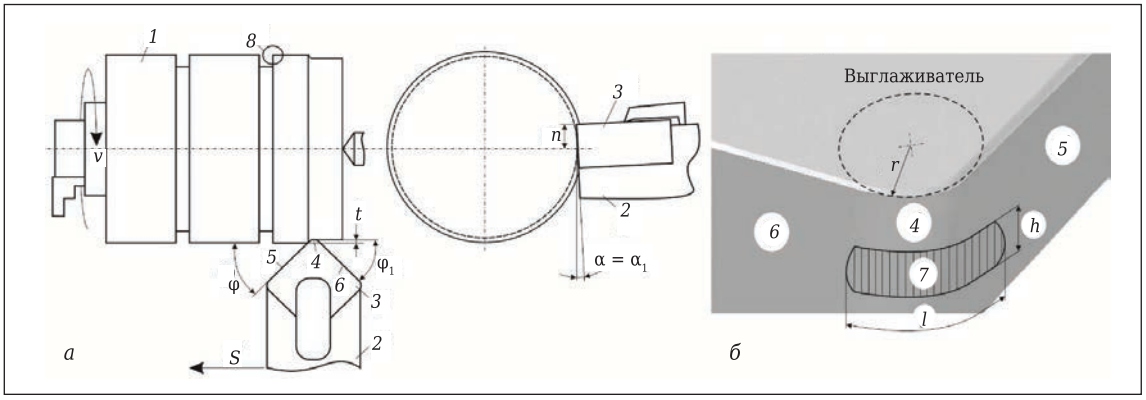

Рис. 1. Схема выглаживания наружной цилиндрической поверхности заготовки (*а*) и расположение участка износа на КВ (*б*)

го прохода из-за интенсивного деформирования микронеровностей на поверхности после точения. Повторные проходы менее заметно влияют на уменьшение *Ra* из-за формирования упрочненного слоя на поверхности заготовки после первого прохода.

В зависимости от режима обработки глубина слоя с измененной структурой ОМ изменяется в диапазоне от 0,4 до 1,7 мм. В этом слое зафиксировано увеличение микротвердости ОМ и формирование остаточных напряжений. Столь существенное изменение состояния поверхностного слоя заготовки связано со сложной схемой деформирования ОМ в процессе выглаживания. Происходящие уменьшение от диаметра заготовки D_1 до диаметра детали D_2 и от средней высоты микронеровностей заготовки H_1 до средней высоты микронеровностей заготовки H_2, а также изменение морфологии поверхности после чистового точения (левая микрофотография) и после выглаживания (правая микрофотография) определяются совокупностью упругих и пластических деформаций в трех характерных областях ОМ (рис. 2).

Результаты металлографических исследований показали, что основные деформации ОМ при выглаживании происходят в первой характерной области *AGCFED* за счет непрерывного процесса единичных актов пластического деформирования элементарных объемов ОМ в области длиной L_1. При этом каждый деформируемый элементарный объем ОМ перемещается по определенной траектории (например, *1* и *2*) от начальной границы *AD* этой области до конечной границы *GF*. Степень деформации элементарных объемов ОМ увеличивается при перемещении в этой области; зерна вытягиваются в направлении перемещения и уменьшаются в направлении сжатия. На границе *GE* элементарные объемы ОМ, имевшие до деформации металла сферическую форму, приобретают вытянутую эллипсовидную форму. Соотношение радиусов эллипсов зависит от удаления элементарного объема ОМ от поверхности заготовки. Наибольшее искажение формы имеют элементарные объемы ОМ, расположенные наиболее близко к поверхности и перемещающиеся по траектории *1* по сравнению с перемещением по траектории *2*. Из-за изменения формы элементарного объема ОМ и неоднородности деформации в этой характерной области свойства поверхностного слоя заготовки приобретают определенную анизотропность.

Контактное трение между перемещающимся КВ и вращающейся заготовкой затрудняет их взаимное скольжение, результатом чего является формирование второй характерной области *ABCG*. Под действием высоких контактных давлений и температур на границе раздела, которая характеризуется плотным контактом ювенильных поверхностей, образуются прочные адгезионные связи. В этих условиях внешнее трение между КВ и ОМ крайне затрудняется, а их взаимное перемещение реализуется по механизму внутреннего трения в этой области вдоль площадки контакта. За счет этого ОМ дополнительно деформируется, а на рабочих поверхностях КВ образуются налипы ОМ. Присутствие этой характерной области заметно усложняет и усиливает неоднородность деформации ОМ в поверхностном слое заготовки.

В третьей характерной области *BCFE* происходит упругое восстановление поверхностного слоя заготовки детали на участке контакта L_2. В этой области элементарные объемы ОМ приобретают окончательную форму и среднюю высоту микронеровностей H_2. Результатом действия упругих деформаций в этой области является увеличение диаметра заготовки до D_2. Область $CC^1F^1E^1$ определяет конечное состояние поверх-

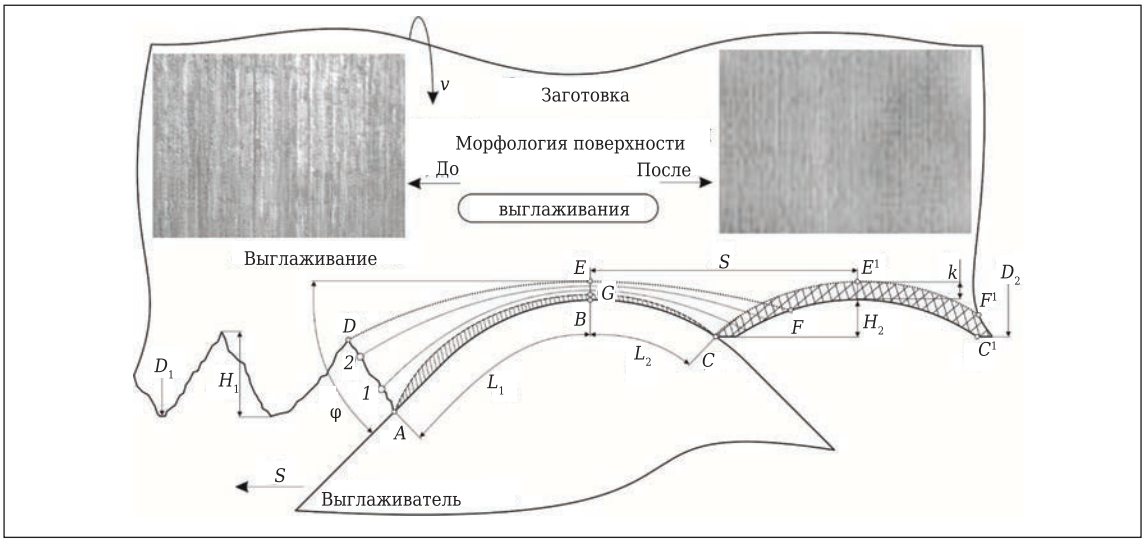

Рис. 2. Схема деформаций ОМ в поверхностном слое заготовки при выглаживании наружной цилиндрической поверхности

ностного слоя детали после выглаживания и его соответствие техническим требованиям.

Процесс деформации ОМ при выглаживании генерирует комплекс силовых и тепловых нагрузок, действующих на КВ. В результате сопротивления металла деформированным нагрузкам возникают реактивные силы, действующие на контактные площадки КВ и направленные перпендикулярно к рабочей поверхности инструмента. Также формируется тепловой источник, мощность которого генерируется в каждой характерной области деформаций. Наибольшее влияние на мощность этой системы оказывает режим выглаживания. Тепловые потоки из этого источника поступают в заготовку, КВ и окружающую среду и начинают влиять на характеристики процесса выглаживания. Важную роль в формировании теплового баланса в зоне контакта играет низкая теплопроводность Al_2O_3–TiC-керамики, следствием чего является преимущественный сток тепла в заготовку [14, 15]. При этом поверхность заготовки нагревается выше, чем при использовании алмазного выглаживателя. Однако в поверхностном слое оксидно-карбидной керамики формируются напряжения, характеризующиеся высокой неоднородностью [16].

Под действием выявленных эксплуатационных нагрузок КВ нагревается и деформируется; в нем формируется определенное напряженное состояние и протекают сложные физико-химические процессы. Совокупность этих факторов определяет характер износа КВ. В первоначальный момент трения контактное взаимодействие КВ с ОМ происходит по микровыступам, что приводит к образованию адгезионных связей между ОМ и керамикой. За счет этого образуется площадка трения, на которой значительная часть керамической поверхности *1* покрыта налипами ОМ *2* разных размеров (рис. 3, *а*).

Налипы имеют форму чешуек толщиной до 5 мкм, причем их внешняя поверхность имеет гладкую морфологию с многочисленными рисками, ориентированными в направлении скольжения. Также на этой поверхности имеются разнонаправленные трещины *3*, задиры *4*, области слияния трещин *5* и локального разрушения керамики *6*. В поверхности налипов ОМ обнаружены частицы *7* разной формы, структура которых отличается от структуры ОМ. Природа происхождения этих частиц может быть связана с вырывом зерен из керамического каркаса и образованием оксидной пленки на ОМ. Эти частицы, имеющие высокую твердость, являются основным элементом абразивного износа рабочих поверхностей КВ.

Налипы стали, образовавшиеся на поверхности КВ, изменяют условия контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и усложняют характер действующих на него эксплуатационных нагрузок. Под действием циклических силовых нагрузок на внешнюю поверхность налипов *2*, инициируемых процессом трения, в налипах интенсивно растут многочисленные трещины *3* и разрушаются адгезионные связи между керамикой и ОМ. Это приводит к периодическому разрушению и отслоению налипов и значительно ускоряет разрушение керамики, так как при отрыве фрагментов налипа поверхностный слой *1* керамики остается незащищенным.

Высокие локальные напряжения, сформировавшиеся в поверхностном слое керамики под действием эксплуатационных нагрузок, являются основной причиной появления эксплуатационных дефектов в поверхностном слое КВ [17]. После стравливания налипов ОМ можно наблюдать поверхностную структуру керамики с многочисленными структурными дефектами эксплуатационного происхождения (рис. 3, *б*). На этой поверхности имеются многочисленные единичные несплошности *8*, скопления несплошностей *9* и трещины *10*, образовавшиеся между плотноупакованными зернами. На поверхности керамики обнаружены отдельные зерна *11* со сколотыми гранями и пустоты *12*, образовавшиеся в результате вырыва единичных поверх-

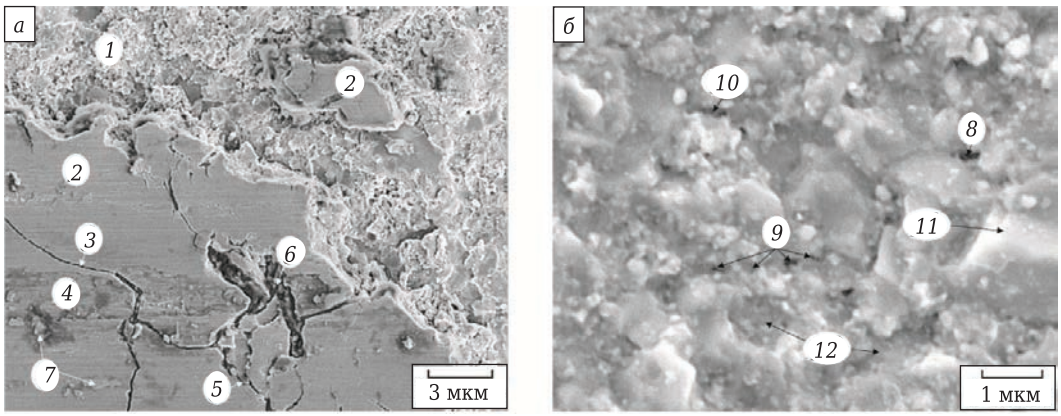

Рис. 3. Микроструктура площадки износа на КВ до (*а*) и после (*б*) стравливания налипов ОМ

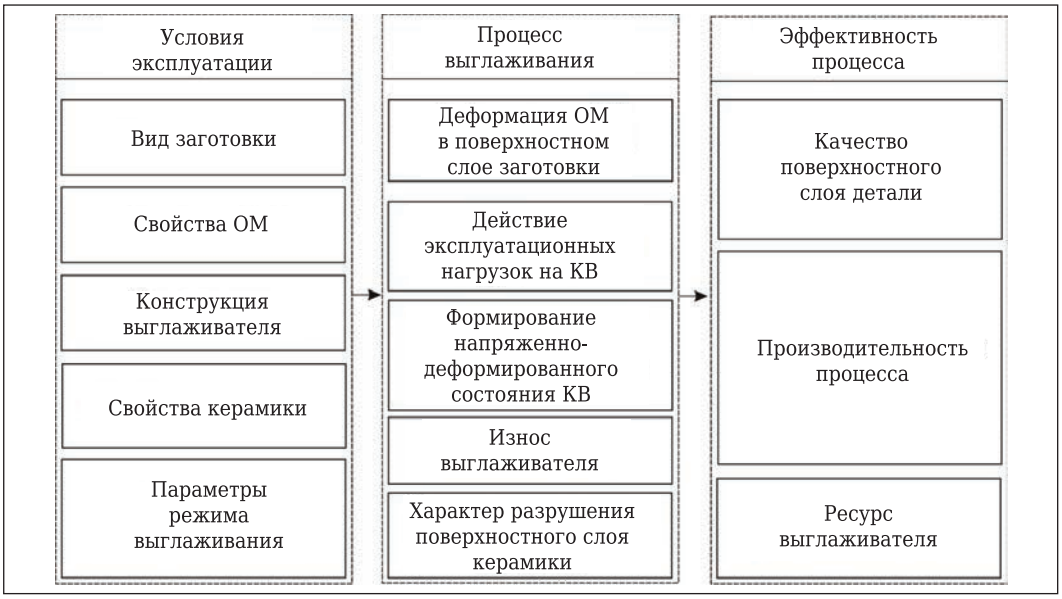

Рис. 4. Система эксплуатации КВ при выглаживании наружной поверхности цилиндрической заготовки

ностных зерен из керамического каркаса. Это означает, что в износе КВ задействованы механизмы транс- и межкристаллитного разрушения ее поверхностного слоя, который ослаблен структурными дефектами, образовавшимися при выглаживании. Рост трещин из структурных дефектов приводит к микроразрушению поверхности керамики и вырыву единичных зерен и их конгломератов из каркаса.

На основе экспериментальных данных разработана модель эксплуатации КВ, включающая три подсистемы: «условия эксплуатации», «процесс выглаживания» и «эффективность процесса», каждая из которых состоит из блоков (рис. 4). Подсистема «условия эксплуатации» является входом в систему и состоит из четырех блоков: «вид заготовки», «свойства ОМ», «конструкция выглаживателя», «свойства керамики» и «параметры режима выглаживания». Вид заготовки, свойства ОМ и технические требования к поверхностному слою детали определяют схему выглаживания и используемое оборудование. Свойства ОМ и керамики задаются твердостью, прочностью, плотностью, модулем упругости, температурным коэффициентом линейного расширения, коэффициентами теплопроводности и теплоемкости. Параметры режима выглаживания включают свойства смазки при ее применении.

В состав центральной подсистемы «процесс выглаживания» входят четыре блока: «деформация ОМ в поверхностном слое детали», «действие эксплуатационных нагрузок на КВ», «формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) КВ», «износ КВ» и «характер разрушения поверхностного слоя керамики».

Выходная подсистема «эффективность процесса» состоит из трех блоков «качество поверхностного слоя детали», «производительность процесса» и «ресурс КВ». Под эффективностью процесса следует понимать интегральный показатель, определяемый отношением конечного результата функционирования рассматриваемой системы к затраченным ресурсам. Блок «качество поверхностного слоя детали» определяет фактическое соответствие установленным техническим требованиям к состоянию поверхностного слоя детали. Производительность процесса волочения во многом зависит от ресурса КВ и его способности противостоять износу. В том случае, когда КВ характеризуется высоким ресурсом, появляется реальная возможность увеличить скорость выглаживания и, соответственно, повысить производительность этого процесса. Этот результат можно обеспечить на основе детального исследования зарождения структурных дефектов и роста трещин поверхностных дефектов под действием эксплуатационных нагрузок [18]. Построенная система позволяет эффективно исследовать этот процесс с использованием метода математического моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что выглаживание наружной поверхности цилиндрической заготовки с использованием КВ обеспечивает уменьшение шероховатости поверхностей и увеличение микротвердости за счет изменения поверхностной структуры ОМ. Процесс выглаживания происходит в результате сложных деформаций в трех характерных областях, генерирующих комплекс силовых и тепловых нагрузок, действующих на КВ. Важную роль в формировании этих нагрузок играют свойства Al_2O_3–TiC-керамики. Под действием эксплуатационных нагрузок в КВ про-

текают сложные физико-химические процессы, определяющие характер износа КВ. Высокие локальные напряжения, сформировавшиеся в поверхностном слое керамики под действием эксплуатационных нагрузок, являются основной причиной появления эксплуатационных дефектов в поверхностном слое КВ. Рост трещин из структурных дефектов приводит к микроразрушению поверхности керамики и вырыву единичных зерен и их конгломератов из каркаса.

На основе экспериментальных данных разработана система эксплуатации КВ, связавшая в единое целое три подсистемы: «условия эксплуатации», «процесс выглаживания» и «эффективность процесса». Построенная система позволяет эффективно исследовать процесс выглаживания наружной поверхности цилиндрической заготовки, реализуемого КВ, с использованием метода математического моделирования.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Библиографический список

1. ***Суслов, А. Г.*** Качество поверхностного слоя деталей машин / *А. Г. Суслов.* — М. : Машиностроение, 2000. — 320 с.

2. ***Одинцов, Л. Г.*** Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / *Л. Г. Одинцов.* — М. : Машиностроение, 1981. — 160 с.

3. ***Лалазарова, Н. А.*** Управление качеством поверхности при алмазном выглаживании деталей из высокопрочного чугуна / *Н. А. Лалазарова, Л. И. Путятина, Л. А. Тимофеева* [и др.] // Вестник ХНАДУ. — 2011. — Вып. 54. — С. 114–117.

4. ***Башков, Г. П.*** Выглаживание восстановленных деталей / *Г. П. Башков.* — М. : Машиностроение, 1979. — 80 с.

5. ***Барац, Я. И.*** Финишная обработка металлов давлением (теплофизика и качество) / *Я. И. Барац.* — Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1982. — 181 с.

6. ***Торбило, В. М.*** Алмазное выглаживание / *В. М. Торбило.* — М. : Машиностроение, 1972. — 105 с.

7. ***Кузин, В. В.*** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.

Kuzin, V. V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / *V. V. Kuzin* // Refract. Indust. Ceram. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.

8. ***Гадалов, В. Н.*** Методика оценки шероховатости поверхности электроискрового покрытия после выглаживания минералокерамикой / *В. Н. Гадалов, Д. Н. Романенко, В. В. Самойлов* [и др.] // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2010. — № 4. — С. 44–46.

9. ***Григорьев, С. Н.*** Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / *С. Н. Григорьев, В. В. Кузин* // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17–22.

Grigoriev, S. N. Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / *S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin* // Glass Ceram. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.

10. ***Кузин, В. В.*** Контактные процессы при резании керамическими инструментами / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, М. Ю. Фёдоров* // Вестник МГТУ «Станкин». — 2010. — № 4. — С. 85–94.

11. ***Верещака, А. С.*** Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью термоиндикаторных веществ / *А. С. Верещака, В. М. Провоторов, В. В. Кузин* [и др.] // Вестник машиностроения. — 1986. — № 1. — С. 45–49.

12. ***Волосова, М. А.*** Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / *М. А. Волосова, В. В. Кузин* // Металловедение и термическая обработка. — 2012. — № 1. — С. 40–46.

Volosova, M. A. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / *M. A. Volosova, V. V. Kuzin* // Met. Sci. Heat Treat. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.

13. ***Кузин, В. В.*** Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2003. — № 12. — С. 41–45.

Kuzin, V. V. Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 32–36.

14. ***Кузин, В. В.*** Тепловое состояние керамических режущих инструментов при высокоскоростной обработке резанием / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2004. — № 9. — С. 47–52.

Kuzin, V. V. Thermal state of ceramic cutting tools in high-speed cutting / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 9. — P. 32–40.

15. ***Кузин, В. В.*** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Фёдоров* // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

Kuzin, V. V. Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2: Microlevel / *V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. Yu. Fedorov* // Journal of Friction and Wear. 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.

16. ***Кузин, В. В.*** Неоднородность напряжений в поверхности оксидно-карбидной керамики с развитым рельефом под действием теплового потока / *В. В. Кузин, М. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2015. — № 10. — С. 63–66.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in oxide-carbide ceramic surface with developed relief under action of heat flow / *V. V. Kuzin, M. R. Portnoi, S. Yu. Fedorov* // Refract. and Indust. Ceram. — 2016. — Vol. 56, № 5. — P. 557–560.

17. ***Кузин, В. В.*** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.

Kuzin, V. V. Microstructural model of ceramic cutting plate / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31. — No. 5. — P. 479–483.

18. ***Кузин, В. В.*** Методологический подход к повышению работоспособности керамических инструментов / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2006. — № 9. — С. 87–88. ■

Получено 23.01.18
© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова, 2018 г.