

В. А. Иванов, А. В. Иванов, А. А. Долинин, О. А. Халтурин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АЛМАЗНОМ ХОНИНГОВАНИИ БРУСКАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ

Описана математическая модель формирования шероховатости поверхности при алмазном хонинговании брусками на металлических связках. Приведено сравнение численного и натурального экспериментов влияния характеристик алмазных брусков на шероховатость обработанной поверхности. Показана адекватность математической модели. *Алмазное хонингование; Ra; Sm; D; τ ; образование шероховатости поверхности*

Алмазное хонингование в сравнении с другими финишными технологическими процессами отличается большей площадью контакта хонинговального бруска с поверхностью обрабатываемого отверстия, низкими скоростями резания, малой величиной рабочего давления, низкой температурой поверхностного слоя заготовки, большой стойкостью алмазных брусков и высокой производительностью процесса [1, 2, 3]. Эти особенности алмазного хонингования и определяют широкое распространение данного процесса при изготовлении различных деталей машин. Алмазное хонингование в сравнении с абразивным отличается повышенной стойкостью формы брусков, что обуславливает повышение точности обрабатываемых отверстий и во многом определяет экономичность процесса хонингования [4, 5, 6]. По данным, приведенным в работах [7, 8], алмазное хонингование значительно повышает долговечность и эксплуатационную надежность деталей машин.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В известных математических моделях формирования шероховатости хонингуемых поверхностей для описания взаимодействия алмазной поверхности хонинговального бруска и обрабатываемой поверхности используются различные методы (геометрический, метод эффективного профиля, метод объемного компьютерного моделирования и др.) [5, 9, 10].

Существующие методы математического моделирования процессов механической обработки используют закономерности, описывающие форму отдельных формообразующих элементов (алмазных зерен, электрических импульсов и т.д.), их распределение по поверхно-

сти, последовательность изменения, влияние на профиль обработанной поверхности и не дают полного представления об образовании микропрофиля этой поверхности.

В известных работах Ю. К. Новоселова [11], С. А. Попова [12] и других ученых при моделировании учитываются такие характеристики рабочей поверхности абразивного инструмента, как высота выступания алмазных зерен над уровнем связки, средневероятностное расстояние между алмазными зернами, число режущих граней на единицу длины зерна, количество абразивных зерен, участвующих в резании. Однако все эти исследования посвящены процессу шлифования и не могут быть в полной мере применимы к процессу алмазного хонингования. Как правило, эти описания рабочей поверхности абразивных инструментов отражают в основном взаимодействие отдельного зерна с обрабатываемой поверхностью, без полного учета формы режущих элементов поверхности инструмента.

В работе [13] описание характеристики рабочей поверхности алмазного бруска проведено на основе теории случайных функций. Для определения средней высоты рабочего профиля бруска была использована характеристика случайной функции – математическое ожидание числа режущих кромок на единицу рабочей поверхности бруска, а периодичность расположения зерен по высоте и шагу определялась по уравнению корреляционной функции.

Практически все известные модели позволяют прогнозировать образование высотных параметров микропрофиля обработанной поверхности. В то же время известно, что существенное влияние на износостойкость оказывают параметры в направлении длины микропрофиля и величина относительной опорной длины микропрофиля.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В результате анализа существующих работ и проведенных исследований выдвинута гипотеза, заключающаяся в том, что параметры шероховатости поверхности при алмазном хонинговании отверстий в значительной степени определяются не только размерами алмазных зерен и их числом, но и распределением по высоте и длине профиля брусков.

Для полного представления об образовании профиля обработанной поверхности при алмазном хонинговании необходимо использовать методы теории вероятности и математической статистики. При анализе процесса формирования поверхности должны быть использованы закономерности, описывающие форму отдельных формообразующих элементов (алмазных зерен и т. д.), их движение, последовательность изменения и влияние на профиль обработанной поверхности.

Анализ отклонений профиля поверхности с установившейся шероховатостью, обработанной алмазным бруском, свидетельствует об их подчинении закону нормального распределения. Поэтому удобнее пользоваться не дисперсией, имеющей размерность квадрата случайной величины, а среднеквадратическим отклонением.

Как правило, при алмазном хонинговании алмазные бруски работают в режиме самозатачивания, следовательно, можно считать, что профиль рабочей поверхности бруска остается постоянным на протяжении всего времени работы. Это позволяет сохранить математическое описание характеристики рабочей поверхности бруска до полного износа алмазного слоя.

Таким образом, процесс математического моделирования формирования шероховатости обработанной поверхности должен включать в себя два этапа: 1) моделирование рабочей поверхности хонинговального бруска, 2) моделирование образования шероховатости обработанной поверхности при хонинговании.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО БРУСКА

Математическое моделирование поверхности алмазного бруска заключается в представлении алмазных зерен в виде сфер диаметрами D , зависящими от зернистости, и последующем распределении их по рабочей поверхности с разной высотой выступания.

Зернистость порошка определяется по размеру зерен его основной фракции. Для любой зернистости распределение размеров зерен алмазного порошка по фракциям подчиняется за-

кону нормального распределения. Проведя соответствующие расчеты, используя программный продукт MathCad, получили зависимости параметров распределения размеров зерен от зернистости порошка: $D_{cp} = 0,85x$ – средний диаметр зерна; $\sigma = 0,137x$ – среднеквадратическое отклонение.

Для математического моделирования распределения зерен по рабочей поверхности алмазного бруска применим квазиравномернораспределенную ЛП_τ последовательность. Последовательность точек Q_0, Q_1, \dots, Q_i , принадлежащих единичному n -мерному кубу K^n , называется ЛП_τ последовательностью, если любой ее двичный участок, содержащий не менее чем $2^{\tau+1}$ точек, представляет собой Π_τ сетку. Π_τ сетки имеют более равномерное распределение в сравнении с обычными кубическими решетками вследствие того, что при проецировании таких сеток на пространство с меньшей размерностью количество точек сохраняется (рис. 1).

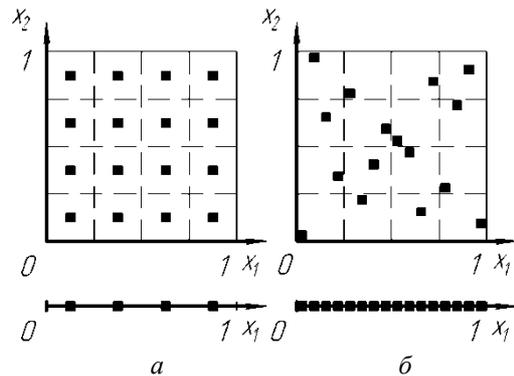


Рис. 1. Примеры проецирования распределений при $n = 2$ ($N = 16$):
а – кубическая решетка; б – Π_τ сетка

Исследованием ЛП_τ последовательностей занимаются И. М. Соболев и Р. Б. Статников [14]. Ими разработан алгоритм расчета для 51-мерного куба с числом точек 2^{20} .

Декартовы координаты точки $Q_i = (q_{i,1}, \dots, q_{i,n})$ рассчитываются на основе составленной И. М. Соболевым и Р. Б. Статниковым таблицы числителей направляющих чисел по формуле:

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2 \{i 2^{-l}\}] [2 \{r_j^{(l)} 2^{k-1-l}\}] \right\},$$

где $r_j^{(l)}$ – числители направляющих чисел; j – номер грани n -мерного куба K^n ($1 \leq j \leq 51$); l – показатель степени числа точек ($1 \leq l \leq 20$). Квадратные и фигурные скобки означают соответственно целую и дробную части содержимого этих скобок.

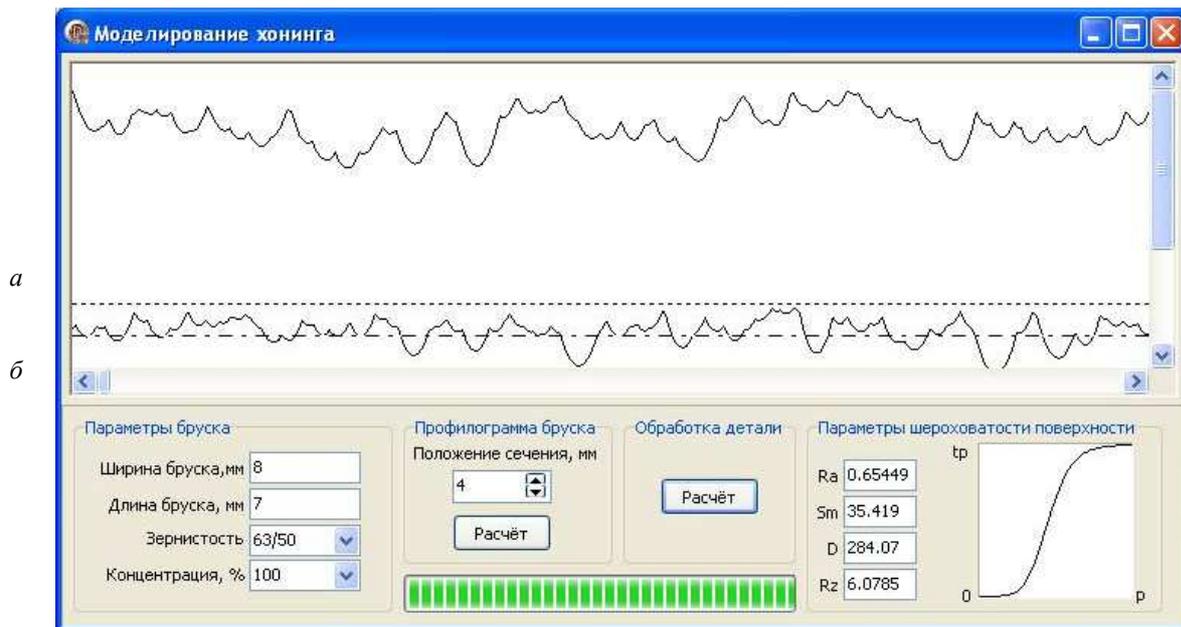


Рис. 2. Внешний интерфейс программы:
а – поверхность бруска; *б* – обработанная поверхность

При моделировании одну из граней многомерного единичного куба смасштабируем до размеров рабочей поверхности бруска. В результате получим набор координат зерен, равномерно распределенных по поверхности бруска.

Число алмазных зерен на единицу площади рабочей поверхности бруска определится:

$$z = \frac{12 \cdot K_c}{\pi \cdot x^2}, \tag{1}$$

где x – наибольший размер зерен данной зернистости; K_c – коэффициент концентрации, отражающий процентное соотношение абразива и связки.

Плотность распределения высоты выступания зерен над поверхностью бруска определится по формуле

$$g = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H-H_{cp})^2}{2\sigma^2}}, \tag{2}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; H_{cp} – средняя высота зерен над уровнем связки; H – высота зерна.

Для различных зернистостей алмазных брусков средняя высота зерен над уровнем связки H_{cp} и среднеквадратические отклонения σ приведены в таблице [15].

Проведя регрессионный анализ данных таблицы, получим линейные зависимости параметров распределения высоты выступания зерна над уровнем связки от радиуса сферы R , имитирующей зерно. Высота выступания зерна над уровнем связки в зависимости от размеров ха-

рактеризуется зависимостью $H_{cp} = 0,201R - 5,628$. Зависимость среднеквадратического отклонения от размеров зерен $\sigma = 0,053R + 3,181$ [16].

Таблица
Средняя высота зерен над уровнем связки и среднеквадратические отклонения

Зернистость брусков	H_{cp} , мкм	σ
80/63	5,9	4,69
125/100	7,9	12,04
315/250	14,5	37,01

Полученные данные о рабочей поверхности инструмента позволили построить элементарный режущий профиль бруска. По известным координатам вершины зерна и его диаметру вычисляются координаты образующей профиля. Шаг дискретности при этом составляет 0,001 мм. Все полученные таким образом профили зерен накладываются друг на друга, образуя при этом непрерывную линию режущего профиля бруска (см. рис. 2, *а*).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ХОНИНГОВАНИИ

Моделирование последовательности снятия припуска заготовки элементарными режущими профилями бруска заключается в наложении и последующем вычитании координат профиля бруска из координат профиля заготовки. При-

нималось, что алмазные зерна не утапливаются в связку, так как связка брусков предполагалась металлической.

По завершении процесса получается профиль поверхности обработанной заготовки (рис. 2, б). Исследованиями установлено: профилограмма поверхности, полученная при моделировании, схожа с профилограммой обработанной поверхности. Далее определяются параметры шероховатости моделируемой поверхности в соответствии с требованиями ГОСТ 25142-82.

Для оценки адекватности предложенной математической модели прогнозирования параметров шероховатости отверстий, подготовленных под азотирование, расчетные данные исследований по математической модели были сопоставлены с экспериментальными данными.

Доказательство адекватности математической модели представлено на рис. 3–5. На рисунках помещены экспериментальные графики 1 зависимости параметров Ra , Sm и D от зернистости алмазных брусков, которые совмещены с графиками 2, рассчитанными по математической модели.

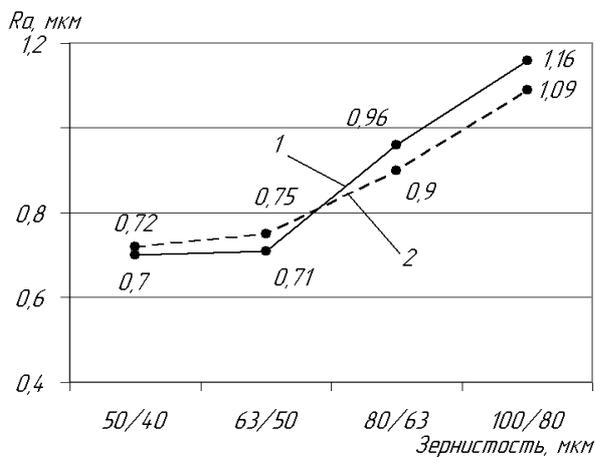


Рис. 3. Графики изменения параметра шероховатости Ra в зависимости от зернистости алмазных брусков:
1 – экспериментальный;
2 – рассчитанный по модели

Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными параметров шероховатости Ra , Sm и D составляет соответственно 5,1%; 11,7% и 6,2%.

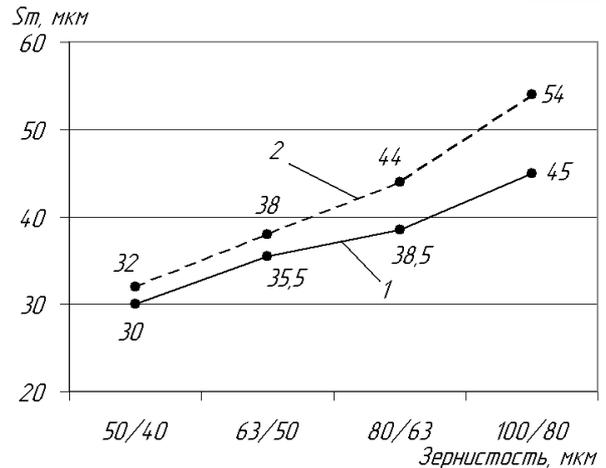


Рис. 4. Графики изменения параметра шероховатости Sm в зависимости от зернистости алмазных брусков:
1 – экспериментальный;
2 – рассчитанный по модели

Аналогичные графики были построены для параметров Ra , Sm и D в зависимости от концентрации алмазов.

Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными параметров шероховатости Ra – среднее квадратическое отклонение, Sm – средний шаг неровностей профиля и D – плотность выступов профиля, составило соответственно 3,3%; 0,3% и 0,2%.

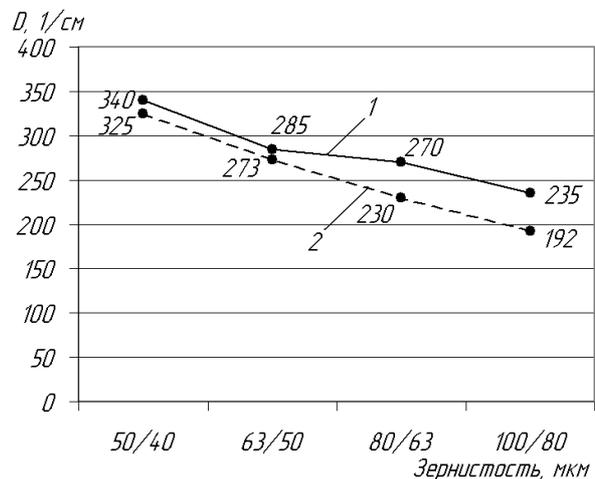


Рис. 5. Графики изменения параметра шероховатости D в зависимости от зернистости алмазных брусков:
1 – экспериментальный;
2 – рассчитанный по модели

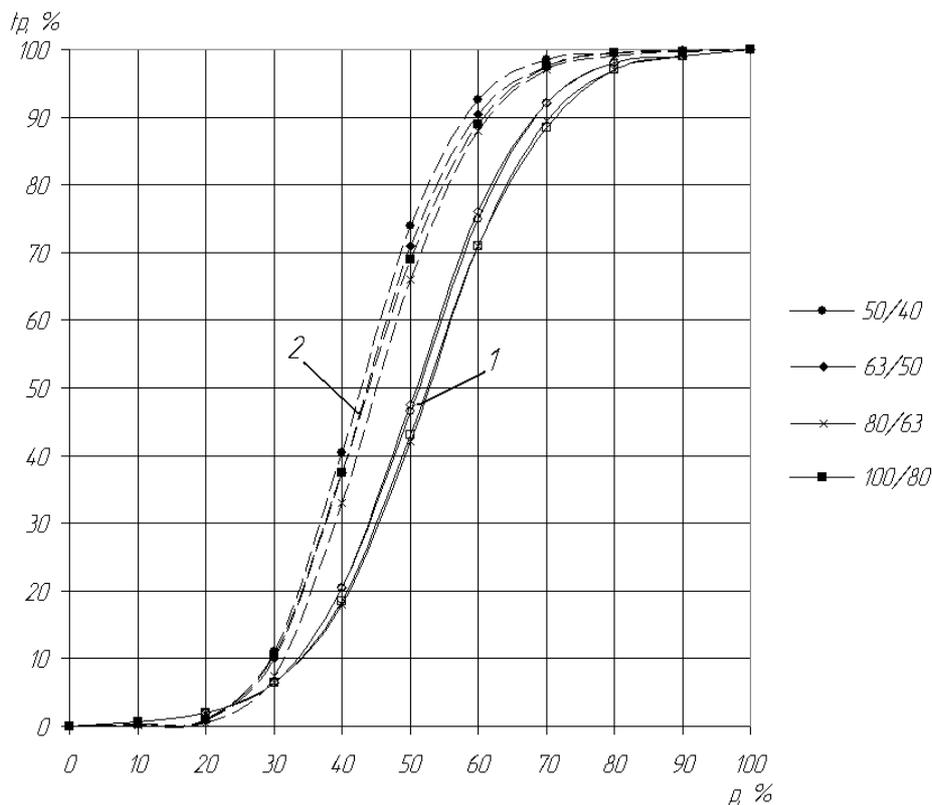


Рис. 6. Графики изменения относительной опорной поверхности профиля в зависимости от зернистости алмазов: 1 – экспериментальные; 2 – рассчитанные по модели

Сравнение графиков относительной опорной длины профиля, построенных на основании расчетных значений (рис. 6), а также данных, полученных экспериментальным путем в зависимости от зернистости и концентрации алмазных брусков, позволяет сделать вывод об удовлетворительной сходимости теории и эксперимента и, следовательно, адекватности модели. Расхождение в значениях уровней сечений p для одной и той же относительной опорной длины профиля t_r не превышает 10%.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель и программное обеспечение прогнозирования формирования шероховатости обработанной поверхности при алмазном хонинговании. На основе данных о рабочей поверхности хонинговальных брусков построены элементарные режущие профили по известным координатам вершин зерен и их радиусам. Определены координаты образующей профиля поверхности инструмента и проведено моделирование процесса образования микропрофиля обработанной поверхности. Разработанная математическая модель учитывает основные параметры характеристики алмаз-

ных брусков и позволяет прогнозировать формирование как высотных параметров шероховатости, так и параметров, связанных со свойствами неровностей в направлении длины профиля, а также опорных кривых моделируемых поверхностей.

Проведенная проверка подтвердила удовлетворительную сходимость результатов расчетов по математической модели с экспериментом, а следовательно, адекватность математической модели. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными параметров шероховатости находится в пределах 0,2...11,7%. Расхождение в значениях уровней сечений p для одной и той же относительной опорной длины профиля t_r не превышает 10%.

Разработанная математическая модель для прогнозирования параметров шероховатости хонингуемой поверхности вполне применима для практического использования. Она позволяет еще на стадии проектирования технологического процесса прогнозировать шероховатость поверхности после алмазного хонингования брусками на металлических связках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазное хонингование глубоких и точных отверстий / С. Г. Бабаев [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. 103 с.
2. **Бабичев А. П.** Хонингование. М.: Машиностроение, 1965. 97 с.
3. Алмазное хонингование деталей машин / В. Н. Бакуль [и др.]. Киев.: УкрНИИТИ, 1968. 62 с.
4. **Кремень З. И., Стратиевский И. Х.** Хонингование и суперфиниширование деталей. Л.: Машиностроение, 1988. 137 с.
5. **Кудояров Р. Г.** Повышение точности формы и качества поверхности деталей при алмазном хонинговании на мехатронных станках: дисс... д-ра техн. наук. Уфа, 2003. 293 с.
6. Справочник по технологии резания металлов / под ред. Г. Шпура, Т. Штеферле. М.: Машиностроение, 1985. Кн. 2. 688 с.
7. Алмазное хонингование деталей машин / В. Н. Бакуль [и др.]. Киев: УкрНИИТИ, 1968. 62 с.
8. Технология производства двигателей летательных аппаратов: учебник / М. И. Евстигнеев [и др.]. М.: Машиностроение, 1982. 260 с.
9. **Горленко О. А., Бишутин С. Г.** Модель рабочей поверхности абразивного инструмента. М.: СТИН. 1999. № 2. С. 25–28.
10. **Горленко О. А., Бишутин С. Г.** Методы управления процессом формирования качества поверхности при механической обработке заготовок деталей машин // Технологическое управление качеством поверхности деталей. Киев: Изд-во АТМ Украины, 1998. С. 51–60.
11. **Новоселов Ю. К.** Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1979. 145 с.
12. **Попов С. А., Наерман М. С.** Рельеф режущей поверхности абразивных и алмазных брусков // Абразивная и алмазная обработка. М., 1968.
13. Применение теории случайных функций к описанию характеристики рабочей поверхности алмазных кругов / В. Ю. Иванкин [и др.] // Управление качеством финишных методов обработки: сб. науч. тр.; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 1996.
14. **Соболь И. М., Статников Р. Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб. пособие для вузов. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
15. **Иванов Ю. И., Носов Н. В.** Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе. М.: Машиностроение, 1985. 88 с.
16. **Иванов А. В.** Технологическое обеспечение износостойкого микропрофиля поверхности цилиндров скважинных насосов хонингованием: дисс... канд. техн. наук; Перм. гос. техн. ун-т. Пермь: Пресстайм, 2009. 23 с.

ОБ АВТОРАХ

Иванов Владимир Александрович, зав. каф. металлореж. станк. и инст. Пермск. гос. техн. ун-та. Д-р техн. наук., проф. (СПбГТУ, 1994). Иссл. в обл. упр-я качеством, алмазно-абразивн. обработки, шероховатости поверхности, износостойкости.

Иванов Александр Владимирович, доц. той же каф. Канд. техн. наук (ИжГТУ, 2009). Иссл. в обл. технологии машиностр., нефтедобычи и переработки, нефтепромыслового оборудования.

Долинин Антон Андреевич, асп. той же каф. Дипл. магистр техн. и технол. (ПГТУ, 2008). Иссл. в обл. алмазн. хонингования, шероховатости поверхности, износостойкости, скважинных штанговых насосов.

Халтурин Олег Александрович, инж. той же каф. Дипл. магистр техн. и технол. (ПГТУ, 2006). Иссл. в обл. шероховатости поверхности, моделирования технологических процессов.