

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК УПОРНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

*С.В. Чернейко, асп.*

*Южно-Уральский государственный университет*

*А.М. Ципенюк, магистрант*

*Израильский Технологический Институт*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния лазерного текстурирования поверхности трения на коэффициент трения и толщину смазочного слоя упорного гидродинамического подшипника с параллельными поверхностями. Показан положительный эффект от текстурирования поверхности на примере сравнения характеристик упорных подшипников.

Обоснована необходимость создания адекватных математических моделей, методов, алгоритмов и программ расчета гидромеханических характеристик подшипников с лазерным текстурированием поверхностей. Это позволит обоснованно выбирать основные параметры текстурирования при проектировании конструкции упорных подшипников.

Развитие транспортного и энергетического машиностроения предполагает разработку роторных машин с большой производительностью и ресурсом работы. Основным узлом, определяющим надежность и эксплуатационные характеристики данного класса машин, является упорный узел, к которому предъявляются следующие требования: достаточная несущая способность, минимальное трение и изнашивание рабочих поверхностей в течение длительного ресурса.

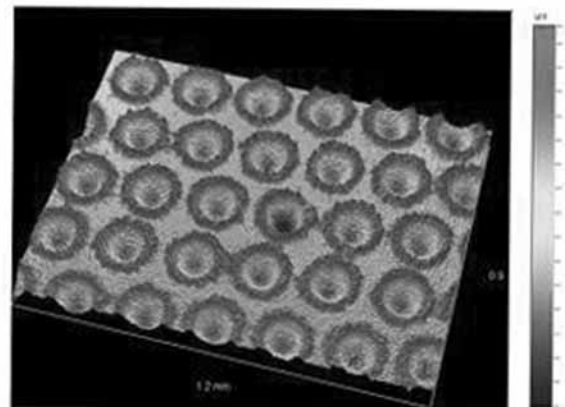
Для повышения несущей способности упорных гидродинамических подшипников авторы работ [1–6] предлагают выполнять текстурирование поверхности подпятника. Известными видами текстурирования поверхности являются продольные и поперечные шероховатости, микроплощадки [1, 2], винтовые канавки [3] и микроямки [4, 5]. В работе [6] описаны преимущества применения лазера для выполнения текстурирования поверхности. В результате лазерного текстурирования на поверхности появляются микроямки с заданным диаметром, глубиной и плотностью их распределения. Фрагмент текстурированной поверхности трения представлен на рис. 1. Авторы выделяют основные преимущества данной тех-



нологии: высокая точность и скорость выполнения операций позволяют легко контролировать форму и размеры микроямок, а также реализовать заданную плотность их распределения на поверхности трибосопряжений.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка потенциальной возможности использования технологии лазерного текстурирования поверхности для повышения несущей способности упорных гидродинамических сегментных подшипников с параллельными поверхностями.

Экспериментальные исследования влияния лазерного текстурирования поверхности на статические характеристики упорного гидродинамического сегментного подшипника (УГСП) выполнена в лаборатории «Триботехника» из-



**Рис. 1. Фрагмент поверхности с лазерным текстурированием**

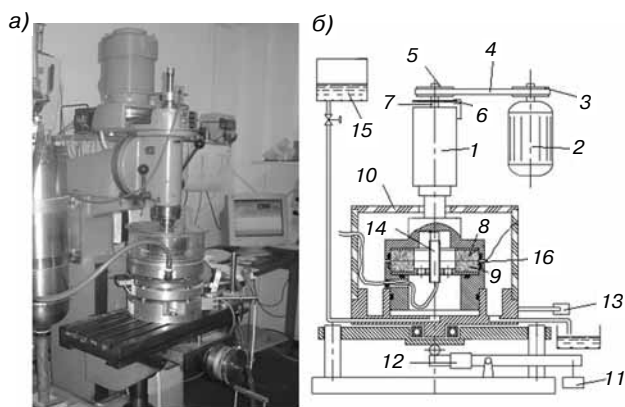


Рис. 2. Общий вид (а) и схема экспериментального комплекса (б)

раильского технологического института «Технион» (г. Хайфа). В работе в качестве смазочной жидкости использовалась вода.

Общий вид и схема экспериментального комплекса приведены на рис. 2, а, б. Основой установки является сверлильный станок (1). Вращение от электродвигателя (2) передается на вал (7) через клиноременную передачу (3 — ведущий ролик, 4 — клиновой ремень, 5 — ведомый ролик). Подшипниковый узел состоит из пяты (8) и подпятника (9), поверхности которых параллельны. Пята вращается с заданной скоростью вместе с валом (7). Подпятник жестко зафиксирован в корпусе стенда. Для наблюдения за экспериментом стенки защитного корпуса (10) выполнены из оргстекла. Осевую нагрузку обеспечивает груз (11). На конце рычага с противоположной стороны от груза (11) установлен датчик для измерения усилия сжатия («Kraft Aufnehmer Typ C9B», НВМ, Германия) (12), который позволяет контролировать прилагаемую нагрузку. Вода поступает в корпус упорного подшипника по трубопроводу из бака (15) и растекается по поверхности трения подпятника. Для измерения момента вязкого трения в эксперименте использовали датчик момента («Wagezelle Load Cell Typ Z8», НВМ, Германия) (14). Датчик определения толщины смазочного слоя (воды) (14) и датчик определения скорости вращения ротора (6), установленные на стенде, выполнены по интеллектуальной вихретоковой системе (НВМ, Германия). Основные преимущества данной системы: бесконтактный способ определения требуемых параметров; низкая погрешность измерений; на сигнал датчика практически не влияют влажность, давление и загрязненность окружающей газовой среды. Вихретоковая система (рис. 3) состоит из датчика и электронного блока. Датчик представляет собой



Рис. 3. Схема вихретоковой системы

ником (в который заключена катушка индуктивности). С помощью кабеля датчик подключается к электронному блоку. Электронный блок вырабатывает сигнал возбуждения катушки индуктивности датчика и осуществляет выделение информативного параметра. После обработки информации электронный блок создает электрический сигнал, прямо пропорциональный расстоянию от торца датчика до контролируемого объекта. Термопара ТХК (16), прилегающая к внешней кромке подпятника, позволяет контролировать температуру воды.

Сигналы датчиков приходят на многоканальный контроллер ВЕ 3200 (НВМ, Германия), который позволяет усилить сигнал, получаемый от датчиков, и преобразовать его в цифровой. После обработки сигнал поступает на РСІ-контроллер, установленный в ПК. РСІ-контроллер вместе с многоканальным контроллером ВЕ 3200 и датчиками образуют информационно-измерительную систему (ИИС) (рис. 4). Инструментом для автоматического сбора и обработки экспериментальных данных является программное обеспечение «Perception».

В табл. 1 представлены предел измерений и класс точности используемых в эксперименте датчиков. Все измеряемые величины изменяются по линейному закону  $y = k \cdot x + b$ . Для тарировки датчиков использовались измерительные приборы (микрометр настольный, тахометр, термометр, тарировочные грузы). Значение, измеренное на приборе, сравнивалось со значением, которое



Рис. 4. Схема информационно-измерительной системы

определяет датчик, и если требовалась корректировка, изменялись коэффициенты  $k$  и  $b$ .

Таблица 1

## Технические характеристики датчиков

Вид датчика/название	Предел измерений	Класс точности
Датчик измерения усилия сжатия / Kraft Aufnehmer Typ C9B	50Н–50 кН	0,5
Датчик измерения крутящего момента / Wagezelle Load Cell Typ Z8	5–1000 Нм	0,5
Датчик определения толщины смазочного слоя, НВМ	0,1–2,1 мм	0,5
Датчик определения скорости вращения ротора, НВМ	5–60 000 об/мин	0,5

Система смазки УГСП выполнена по замкнутой схеме и включает бак слива воды, электрический гидронасос, фильтр грубой очистки для предотвращения попадания мелкодисперсных инородных включений в смазочный слой подшипника, вентили, соединительные трубопроводы, бак подачи воды. Вода поступает в зону контакта из бака подачи воды, в котором установлен концевой выключатель. При заполнении бака поплавки замыкает концевой выключатель, и насос перестает перекачивать воду из бака «для слива воды».

Использованные в эксперименте пяты и подпятники выполнены в виде дисков из карбида кремния (SiC), толщиной 10 мм, с наружным диаметром 85 мм и внутренним 40 мм. Подпятник разделен радиальными канавками на шесть сегментов, на поверхности которых нанесено лазерное текстурирование. Для определения влияния лазерного текстурирования поверхностей сегментов

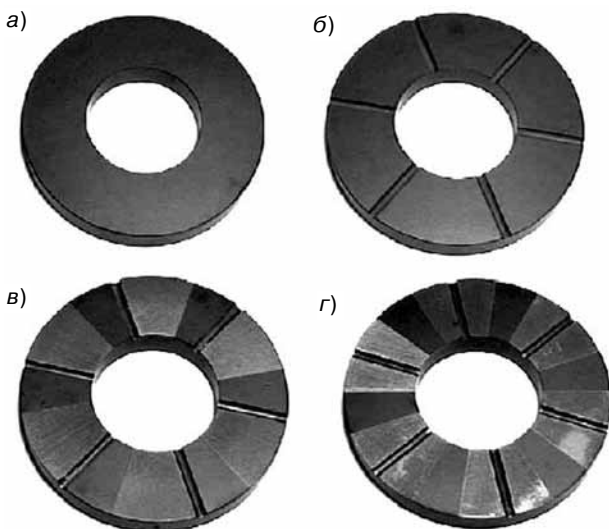


Рис. 5. Фотографии элементов УГСП:

$a$  — пята;  $b$  — подпятник без лазерного текстурирования;  $c$  — подпятник с односторонним лазерным текстурированием;  $d$  — подпятник с двусторонним лазерным текстурированием

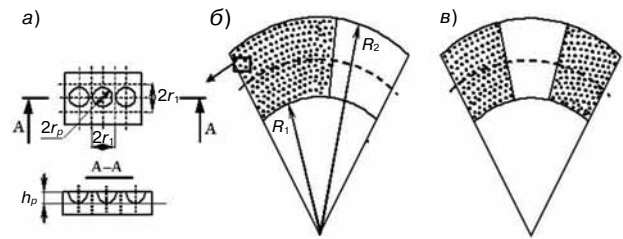


Рис. 6. Элемент и схема поверхности сегмента с лазерным текстурированием:

$a$  — элемент поверхности с лазерным текстурированием;  $b$  — сегмент с «односторонним» лазерным текстурированием поверхности;  $c$  — сегмент с «двусторонним» лазерным текстурированием поверхности

подпятника на характеристики УГСП во всех испытаниях были использованы: одна пята (рис. 5,  $a$ ) и три сегментных подпятника (без лазерного текстурирования поверхности (рис. 5,  $b$ ); с «односторонним» текстурированием, когда обрабатывалась только одна часть поверхности сегментов со стороны входа в них по вращению пяты (рис. 5,  $c$ ); с «двусторонним» текстурированием, при котором обрабатывались две части поверхности сегмента со стороны входа и выхода (рис. 5,  $d$ )). На фотографиях темная часть подпятника — необработанная, светлая — обработанная. Обрабатывали поверхности дисков с помощью пульсирующего лазера на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом, с частотой 5 кГц. Выбор параметров лазерного текстурирования в эксперименте основан на результатах параметрических исследований, представленных в работе [7].

После обработки параметры лазерного текстурирования подпятников (рис. 6,  $a$ ) были измерены на электронном микроскопе Veeco «Wyko NT1100» и их значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Параметры обработки поверхности подпятника

Вид текстурирования	$h_p$ , мкм	$r_p$ , мкм	$S_p$	$\alpha$ , %
Одностороннее	6,3	34,5	0,68	74
Двустороннее	6,5	36,1	0,64	74

Здесь  $S_p = \pi r_p^2 / 4kr_1^2$  — плотность распределения ямок, где  $k = r_2/r_1$  — соотношение размеров ячейки (рис. 6,  $a$ ),  $\alpha$  — часть текстурированной поверхности одного сегмента.

Установлено, что в процессе лазерного текстурирования вокруг ямок образуются выпуклости высотой около 2 мкм (рис. 1). После полировки данные выпуклости были удалены, а замеренная на профилометре «SurfTest» (Mitutoyo, Japan) шероховатость поверхности подпятников  $R_a = 0,04$  мкм. Исходная шероховатость поверх-

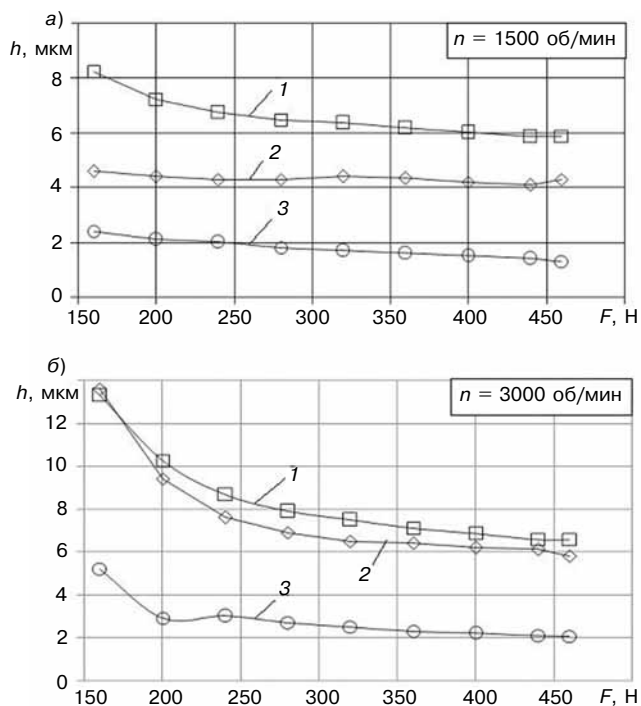


Рис. 7. Зависимость толщины смазочного слоя от нагрузки

ностей пяты и нетекстурированного подпятника  $R_a = 0,03$  мкм. Для корректности сравнения характеристик УГСП с текстурированными и нетекстурированными поверхностями подпятников шероховатость необработанного подпятника была доведена до значения  $R_a = 0,04$  мкм.

Во время эксперимента осевая нагрузка  $F$  увеличивалась с шагом 40 Н от 160 Н до 460 Н, время одного шага 60 секунд. Нижний и верхний предел нагрузки ограничивался возможностями экспериментальной установки. На каждом шаге нагружения фиксировалась толщина смазочного слоя, мкм, момент вязкого трения  $M_{тр}$ , Н·м и температура воды, °С. Эксперимент проводился при двух скоростях вращения ротора: 1500 и 3000 об/мин.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости толщины смазочного слоя  $h$  и коэффициент вязкого трения  $f_{тр}$  от нагрузки  $F$  и скорости вращения ротора  $n$  для трех видов обработки поверхности подпятника. На этих рисунках обозначены:

1 — подпятник с «односторонним» лазерным текстурированием поверхностей сегментов (рис. 6, б);

2 — подпятник с «двусторонним» лазерным текстурированием поверхностей сегментов (рис. 6, в);

3 — подпятник без лазерного текстурирования поверхности.

Как видно из рис. 7, УГСП с текстурированными поверхностями подпятников работают во всем диапазоне нагрузок при больших толщинах

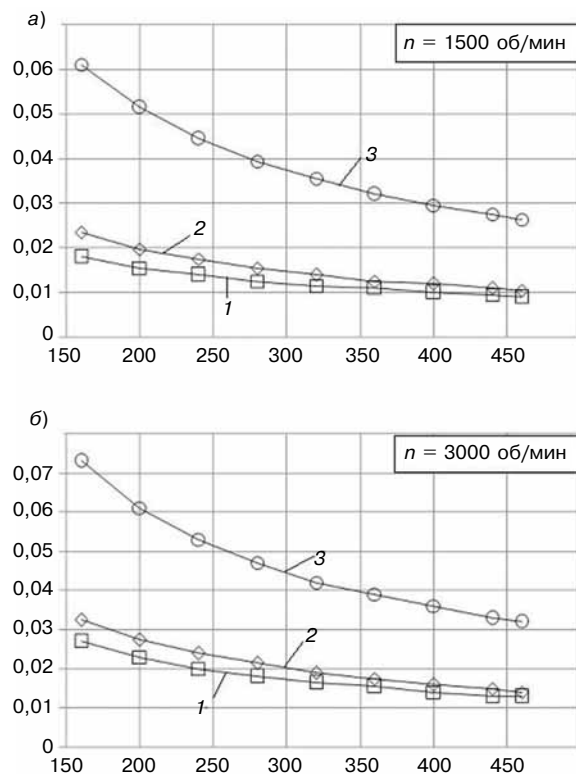


Рис. 8. Зависимость коэффициента вязкого трения от нагрузки

смазочного слоя, чем УГСП с нетекстурированной поверхностью подпятника. При максимальной нагрузке 460 Н и скорости 1500 об/мин толщины смазочного слоя составляют для подпятников: 1 — 5,9 мкм; 2 — 4,3 мкм; 3 — 1,4 мкм. Таким образом, толщина смазочного слоя с «односторонним» текстурированием поверхности подпятника в 4 раза выше, чем у нетекстурированного. Это соотношение сохраняется для всего диапазона нагрузок. Подшипник с «двусторонним» текстурированием поверхности подпятника имеет меньшую толщину смазочного слоя, чем с «односторонним» текстурированием, при этом сохраняет значительное преимущество по сравнению с нетекстурированным подпятником. При скорости 3000 об/мин наблюдается повышение толщины смазочного слоя для всех испытанных подшипников. Значение толщины смазочного слоя подшипника с «двусторонним» текстурированием подпятника приближается к значениям  $h$  при «одностороннем» текстурировании поверхности, причем толщины смазочного слоя по-прежнему примерно в 3 раза выше, чем у нетекстурированного подпятника. Увеличение толщины смазочного слоя возникает из-за повышения несущей способности в упорных подшипниках вследствие нанесения на поверхности сегментов подпятника лазерного текстурирования [1–6].

Зависимость коэффициента вязкого трения для УГСП с «односторонним», «двусторонним» тек-

стированием поверхности подпятников и нетекстурированным подпятником показаны на рис. 8. Коэффициенты трения у УГСП с текстурированными подпятниками (кривые 1 и 2) отличаются незначительно, но при этом коэффициент трения для УГСП с «двусторонним» текстурированием подпятника (кривая 2) выше. Коэффициент трения у нетекстурированного подпятника (кривая 3) значительно выше по сравнению с текстурированными подпятниками. При 1500 об/мин и самой высокой нагрузке 460 Н, коэффициент трения для нетекстурированного подпятника равен 0,026, а для текстурированных подпятников коэффициент трения не превышает значение 0,01. Аналогичная ситуация наблюдается при нагрузке 160 Н: коэффициенты вязкого трения для УГСП с нетекстурированным подпятником равен 0,06, а для УГСП с текстурированными подпятниками не превышает значение 0,02. Таким образом, значения коэффициента трения нетекстурированного подпятника в 2,5–3 раз выше, чем соответствующие значения для УГСП с частичным текстурированием поверхности подпятника. Похожие результаты были получены при скорости 3000 об/мин. Коэффициент вязкого трения с увеличением скорости возрастает на 18 % для текстурированных подпятников и на 10 % — для нетекстурированного подпятника.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили перспективность использования технологии лазерного текстурирования поверхностей трибосопряжений для улучшения гидромеханических характеристик упорных подшипников.

Упорные подшипники с односторонней обработкой можно использовать в машинах с однонаправленным движением ротора, а в случае двухсторонней обработки — в реверсивных опорах и при этом несущая способность снижается не более чем на 10 %, в то время как при использовании в реверсивных опорах подпятников с известными типами сегментов (сегмент в виде наклонной поверхности, сегмент в виде ступеньки Релея) несущая способность упорных подшипников падает примерно в 2 раза [8].

Причиной повышения несущей способности упорного гидродинамического подшипника (рис. 7) является выполнение лазерного текстурирования в виде микроямок на поверхности сегментов подпятника. В результате созданного микрорельефа поверхности в смазочном слое образуются микроклинья [4–7], совместное действие последних дает положительный эффект по созданию несущей способности [7].

Важно отметить, что при одной и той же нагрузке у упорного подшипника с лазерным текстурированием поверхности сегментов подпятника

по сравнению с упорным подшипником, у которого поверхности сегментов подпятника не обработаны, кроме увеличения толщины смазочного слоя происходит снижение коэффициента вязкого трения (см. рис. 7, 8). Предположительно, снижение коэффициента вязкого трения происходит из-за уменьшения касательных напряжений в смазочном слое [9].

Результаты, полученные в данной работе, показали необходимость создания адекватных математических моделей, методов, алгоритмов и программ расчета гидромеханических характеристик УГСП с лазерным текстурированием поверхностей сегментов. Это позволит обоснованно выбирать основные параметры текстурирования при проектировании конструкции УГСП с параллельными поверхностями.

Представленная работа выполнялась при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», Российского фонда фундаментальных исследований (проект НК-13-08-00875\13) и государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 2012044 — ГЗ 05).

#### Литература

1. *Lo S.W.* Lubricant permeation from micro oil pits under intimate contact condition / S.W. Lo, T.C. Horng // *Trans ASME, Journal of Tribology*. — 1999. — Vol. 121(10). — P. 633–638.
2. *Woloszynski T.* Evaluation of numerical methods for the analysis of hydrodynamic bearings / T. Woloszynski, P. Podsiadlo, Gwidon W. Stachowiak // *5th World Tribology Congress 2013*. — 8 — 13 sep. 2013. — Turin: 2013.
3. *Muijderman E. A.* Spiral Groove Bearing: Doc. thesis. — New York. — 1964.
4. *Kovalchenko A.* The effect of laser texturing of steel surfaces and speed-load parameters on the transition of lubrication regime from boundary to hydrodynamic / A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fenske, I. Etsion // *Trib. Trans.* — 2004. — Vol. 47. — P. 299–305.
5. *Oshima Y.* CFD investigation of hydrodynamic lubrication on textured surface — effects of interaction between dimples / Y. Oshima, R. Tsuboi, S. Sasaki // *40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology and Tribochemistry Forum 2013*. — 4–6 sep. 2013. — Lyon: 2013. — P. 35/203
6. *Wang X.* The lubrication effect of micro-pits on parallel sliding faces of SiC in water / X. Wang, K. Kato, K. Adachi // *Trib. Trans.* — 2002. — Vol. 45 (3). — P. 294–301.
7. *Brizmer V.* A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing / V. Brizmer, Y. Kligerman, I. Etsion // *Trib. Trans.* — 2003. — Vol. 46 (3). — P. 397–403.
8. *Орлов П.И.* Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 3-х кн. / П.И. Орлов. — Кн. 2. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 574 с.
9. *Shinkarenko A.* Theoretical analysis of surface-textured elastomer sleeve in lubricated rotary sliding / A. Shinkarenko, Y. Kligerman, I. Etsion // *Trib. Trans.* — 2010. — Vol. 53. — P. 376–385.