

УДК 621.96

А.Л. Аршакян, канд. техн. наук, доцент,
Национальный политехнический университет Армении, Армения,
Тел./Факс 010 235465; E-mail: a.l.arshakyan@mail.ru.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ХОНИНГОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Рассматриваются теоретические и технологические аспекты разработки технологии изготовления поверхностей пары трения с повышенными показателями трибологических характеристик, в частности возможности улучшения условий проникновения в контакт смазывающих веществ без ущерба точностных характеристик и качества поверхностей деталей пары трения.

Ключевые слова: ультразвук, лазерное резание, обкатка, рельеф поверхности.

1. Введение

Развитие современной техники требует повышения точности подвижных соединений, приводящего к неизбежному повышению качества обработанных сопрягаемых поверхностей. При этом точность достигается при соответствующих допусках на посадку, что приводит к сложным задачам, связанным с необходимостью изготовления поверхностей малой шероховатости. Это возможно применением современных технологий суперфиниша, хонингования и размерной полировки. С одной стороны эти условия приводят к снижению возможности обеспечения смазки поверхностей, а с другой к повышению уровня атомарного взаимодействия поверхностей, приводящего к возникновению очагов адгезионного схватывания, вызывающего быстрый износ поверхностей. Поэтому снижаются долговечность и надежность подвижного соединения, а с ней и всей техники. Изготовление подвижного соединения высокого качества обходится дорого. Современные смазывающие вещества эффективны, но их в подвижное соединение надо привести, что не всегда успешно осуществляется ввиду их высокой вязкости. Мало вязкие смазки на поверхности труднодерживаются, стекают и легко выдавливаются, т. е. задача сводится к разработке технологий, позволяющих возможность формирования на обработанной поверхности специального триботехнического рельефа без ущерба требованиям по точности соединения, т.е. подвижности посадки. Показателен пример сочленения цилиндр - кольцо двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

В этом направлении проведены исследования и получены некоторые результаты. Так, после операций хонингования цилиндра ДВС и последующего микрополирования достигается уровень шероховатости поверхности, который удовлетворяет требованиям по посадке. Затем различными технологиями на ней создается специальный рельеф. При этом предпочтение отдается лазерным технологиям и обкатке, имеющие свои недостатки, в первую очередь, по производительности. Множество микрофотографий поверхностей, обработанных ультразвуковым (УЗ) резанем в ГИУА, явились основой для проведения в рамках исследований по разработке технологии структурирования специальных триботехнических структур на обработанной поверхности. По программе исследований предусматривалось изучить процесс УЗ резания и получить поверхности, которые, после тонкой абразивной обработки и хонингования, сохраняют структуру лазерной обработки с лучшими свойствами удерживать смазку. Актуальность задачи не вызывает сомнений, и для машиностроительной науки поиск новых технологических

решений формирования специальных трибологических структур на поверхностях деталей высокой точности является необходимым.

2. Основное содержание и результаты исследования

Основные пункты исследований проведенных в базовой лаборатории “МТ” НПУА: формирование триботехнических структур на поверхностях лезвийным резанием (рис.1);

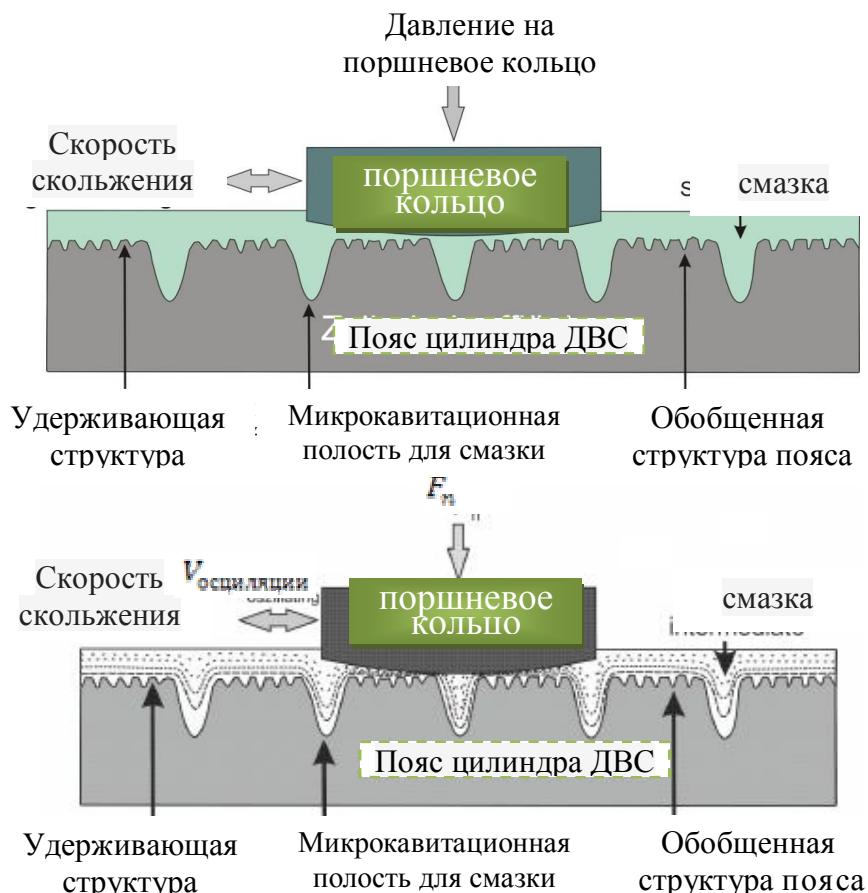


Рис. 1. Схемы контакта цилиндра с триботехническим рельефом и поршневого кольца, имеющего бочкообразность, позволяющую за счет кавитационных явлений выдавливать смазку в зону контакта

- выявление возможности сохранения на поверхностях трения трибологических структур, полученных лезвийным резанием, после последующих технологических операций тонкого шлифования и хонингования;
- выявление предпосылок для разработки новой технологии формирования трибологических структур на обработанных поверхностях пары трения.

Согласно программе исследования, были проведены теоретические исследования и разработана методика экспериментов, проведен анализ взаимодействия колеблющегося крутильно с УЗ частотой резца и обрабатываемой поверхности при проведении операции растачивания. Рассмотрим пример расчета рабочих углов режущего клина с учетом расположения вершины клина относительно оси заготовки, скорости и подачи резания.

Примем, что режущий клин, имеющий углы $\gamma_c, \alpha_c, \lambda > 0$, установлен выше оси расщаваемого отверстия на величину h_y , т.е. ось крутильных колебаний O_1 выше оси де-

тали σ на величину e_x, e_y (рис. 2а). Тогда передний и задние углы будут отличаться от углов заточки. Воспользуемся принципами ортогонального проектирования [1] и определим угол корректировки σ_N . Величина σ_N не постоянна, так как истинная величина вектора \vec{V} состоит из трех составляющих:

- вектор скорости вращательного движения

$$\vec{V}^b = 2\pi r \rho n \text{ [мм/мин];} \quad (1)$$

- вектор скорости подачи режущего клина

$$\vec{V}^s = nS \text{ [мм/мин];} \quad (2)$$

- вектор скорости УЗК режущего клина

$$\vec{V}^k = \tau_a \omega \rho_k \cos \omega t / 60 \text{ [рад/мин],} \quad (3)$$

где ρ – радиус-вектор обрабатываемой поверхности [мм]; ρ_k – радиус-вектор колебательного движения; n – число оборотов детали [об/мин], S – подача режущего клина; τ_a, ω – соответственно амплитуда и частота УЗК режущего клина [рад], [c^{-1}].

Для облегчения восприятия и представления в планах скоростей, не показаны линии построений и не учтены масштабы проекций скоростей иначе схема усложнилась. Используя диапазоны изменения рабочих углов, имеем

$$\gamma_p = \gamma_c + \sigma_N; \quad \alpha_p^N = \alpha_c - \sigma_N; \quad \operatorname{tg} \alpha_p = \operatorname{tg}(\alpha_c - \sigma_N) \cos \lambda_p; \quad \operatorname{tg} \lambda_p = V_T / V_N. \quad (4)$$

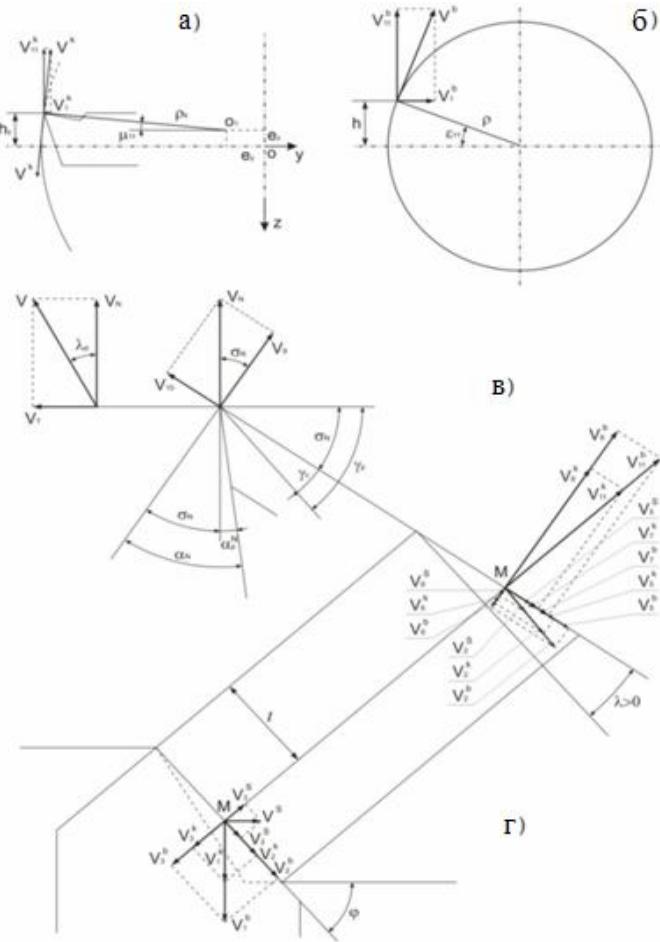


Рис. 2. План скоростей, когда ось колебательных движений в первой четверти поперечного сечения обрабатываемой поверхности

На основе (рис. 2. б, г) и зависимостей (2.1) – (2.3) имеем

$$\varepsilon_{11} = \arcsin h/\rho = \arcsin(h_y + l \cdot \sin\lambda)/\rho, \quad (5)$$

$$V_{11}^b = V^b \cdot \cos\varepsilon_{11}, \quad V_1^b = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11}, \quad (6)$$

$$V_2^b = V_1^b \cdot \sin\varphi = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi, \quad V_3^b = V_1^b \cdot \cos\varphi = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \cos\varphi, \quad (6)$$

$$V_5^b = V_2^b \cdot \cos\lambda = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi \cdot \cos\lambda, \quad V_7^b = V_{11}^b \cdot \sin\lambda = V^b \cdot \cos\varepsilon_{11} \cdot \sin\lambda, \quad (6)$$

$$V_6^b = V_2^b \cdot \sin\lambda = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\lambda, \quad V_8^b = V_{11}^b \cdot \cos\lambda = V^b \cdot \cos\varepsilon_{11} \cdot \cos\lambda, \quad (6)$$

$$V_2^s = V^s \cos\varphi, \quad V_3^s = V^s \sin\varphi, \quad V_5^s = V_2^s \cos\lambda = V^s \cos\varphi \cdot \cos\lambda, \quad V_7^s = V_2^s \cos\lambda = V^s \cos\varphi \cdot \cos\lambda, \quad (7)$$

Радиус-вектор колебательного движения ρ_k , угол отклонения от горизонтальной плоскости μ_{11} и угол отклонения от УЗК τ будут

$$\rho_k = (\rho \cdot \cos\varepsilon_{11} - e_y) / \cos\mu_{11}, \quad \mu_{11} = \operatorname{arctg}[(h - e_z) / (\rho \cdot \cos\varepsilon_{11} - e_y)], \quad (8,9)$$

$$\operatorname{tgt} \tau = a / \rho_k = A \sin\omega t / \rho_k \Rightarrow \tau = \operatorname{arctg}(A \sin\omega t / \rho_k). \quad (10)$$

Следовательно, имеем

$$\begin{aligned} V_{11}^k &= V^k \cos(\mu_{11} + \tau), & V_1^k &= V^k \sin(\mu_{11} + \tau), \\ V_2^k &= V_1^k \sin\varphi = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin\varphi, & V_3^k &= V_1^k \cos\varphi = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cos\varphi \\ V_5^k &= V_2^k \cos\lambda = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin\varphi \cos\lambda, & V_6^k &= V_2^k \sin\lambda = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin\varphi \sin\lambda, \\ V_7^k &= V_{11}^k \sin\lambda = V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \sin\lambda, & V_8^k &= V_{11}^k \cos\lambda = V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \cos\lambda. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_9 &= V_8^b + V_8^s + V_6^k - V_6^b - V_6^s, & V_{10} &= V_3^s - V_3^b - V_3^k, \\ V_N &= V_{10} / \sin\sigma_N, & V_T &= V_5^b + V_5^s + V_7^b + V_7^s + V_7^k. \end{aligned} \quad (12,13)$$

$$\begin{aligned} V_{10} &= V^s \sin\varphi - V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \cos\varphi - V^b \sin\varepsilon_{11} \cdot \cos\varphi = \\ &= S \cdot n \cdot \sin\varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos\varphi. \end{aligned} \quad (14)$$

Угол σ_N определим из условия $\operatorname{ctg}\sigma_N = V_9 / V_{10}$, которое равно

$$\frac{[2\pi\rho n \cdot \cos\varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \cos\lambda}{S \cdot n \cdot \sin\varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos\varphi} -$$

$$\frac{S \cos\varphi \cdot \sin\lambda + [2\pi\rho n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \sin\varphi \cdot \sin\lambda}{S \sin\varphi - [2\pi\rho n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos\varphi}.$$

$$V_N = \{S \sin\varphi - [2\pi\rho n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos\varphi\} / \sin\sigma_N.$$

$$\begin{aligned} V_T &= V^b \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi \cdot \cos\lambda + V^s \cos\varphi \cdot \cos\lambda + V^b \cos\varepsilon_{11} \cdot \sin\lambda + \\ &\quad + V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin\varphi \cdot \cos\lambda + V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin\lambda = \\ &= [2\pi\rho n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \sin\varphi \cdot \cos\lambda + \\ &+ S \cdot n \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda + [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \sin\lambda \end{aligned}$$

На основе этих зависимостей преобразуем (4), тогда

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\lambda_p &= \frac{\{S \cos\varphi + [2\pi\rho n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60]\} \cos\lambda \cdot \sin\sigma_N}{S \cdot n \cdot \sin\varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos\varphi} + \\ &+ \frac{[2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) / 60] \cdot \sin\lambda \cdot \sin\sigma_N}{S \cdot n \cdot \sin\varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos\omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau) / 60] \cos\varphi}. \end{aligned}$$

Но приведенная на рис. 3. схема не привлекательна, т. к. последняя зависимость с учетом, что отношение V^s/V^b для исследуемого диапазона режимов резания должна быть определенной величиной, то σ_N уменьшит передний угол и увеличит задний угол режущего клина. С другой стороны, из зависимости видно, что с снижением n, h_y, ρ и ε снизится величина ε_{11} и, следовательно, $\sin\varepsilon_{11}$. Это приведет к тому, что отмеченный отрицательный эффект σ_N снизится и при определенных значениях n, h_y, ρ и ε станет малым, или приведет к обратному эффекту - увеличению переднего угла клина. Такого эффекта возможно трудно будет достигнуть исходя из конструктивных соображений.

Для представления возможного варианта были рассмотрены случаи, когда ось колебательных движений находится в оставшихся трех четвертях сечения (рис. 4).

Проведем анализ возможных вариантов, в том числе растачивание с УЗК по оси детали, растачивание с радиально направленными УЗК, растачивание с радиальными и крутильными УЗК. На основе кинематики взаимодействия клина и материала, при наложении УЗК, опуская математическое описание, можно сделать заключение:

- с позиций увеличения угла γ_p , для режущего клина с положительным углом λ , при прочих равных условиях, целесообразно применить схему на рис. 4а, а для режущего

клина с углом $\lambda < 0$ – иную схему;

- установление резца ниже оси вращения детали целесообразнее, чем установление выше отмеченной оси;

- изменение рабочих углов режущего клина ограничено и конструктивными соображениями и обеспечением условия отсутствия затирания по фаске износа его задней грани;

- при возбуждении крутильных УЗК вектор скорости УЗК меняется по величине, и по направлению, отклоняясь от тангенциального направления на угол τ .

Подтверждается рост эффективности процесса растачивания, повышение качества поверхности, улучшение динамических показателей процесса резания при наложении на нее крутильных УЗК.

Рис. 4. Варианты расположения оси колебаний в координатах отверстия

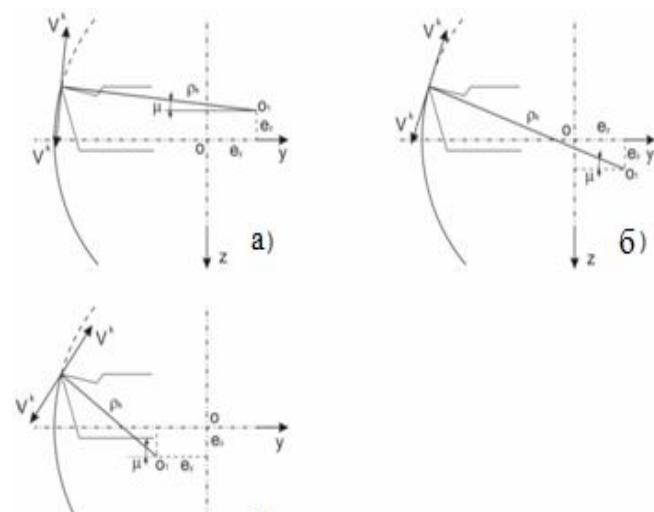
улучшение динамических показателей процесса резания при наложении на нее крутильных УЗК.

В случае наложения на процесс растачивания осевых УЗК сделаны выводы:

- в отличие от крутильных колебаний режущего клина при осевых его УЗК вектор колебательных движений всегда параллелен оси обрабатываемой поверхности, при этом отсутствует переменная прижимающая сила, и изменению подвергаются только две составляющие коэффициента трения;
- для режущего клина и при положительном, и при отрицательном углах наклона лезвия клина λ , с позиций увеличения угла γ_p , установка режущего клина относительно оси вращения детали ниже, при прочих равных условиях, предпочтительнее, чем установка его выше оси вращения или на оси вращения;
- при осевых УЗК влияние вибраций на изменение рабочих углов режущего клина проявляется проще, чем при наложении крутильных УЗК;
- при переходе от крутильных УЗК к осевым проблема затирания задней грани с обработанной поверхностью не изменяется.

При наложения на процесс растачивания крутильно-осевых УЗК сделаны выводы:

- вектор скорости УЗК перемещен в точке режущего лезвия клина по направлению и величине в трехмерном пространстве. При отсутствия осевой составляющей пространственные изменения происходят в плоскости, перпендикулярной плоскости вращательной составляющей УЗК. В случае отсутствия крутильной составляющей пространственные изменения одинаково направлены в направлении осевых УЗК;



- расположение режущего клина ниже оси вращения детали, с позиций увеличения угла γ , предпочтительнее;
- в зависимости от величин векторов скорости крутого движения и скорости резания возможны условия, когда передняя грань клина отрывается от корня стружки, что, с одной стороны положительно, т.к. улучшается проникновения СОЖ в зоны контактов клина; с другой стороны непрерывный процесс резания преобразуется в прерывистый, что будет воздействовать на процесс резания отрицательно. Отметим, что при правильной оценке скоростей можно будет обеспечить такие условия, чтобы отрыв клина от стружки происходил при условиях, когда последующий удар при врезании был по возможности мягким и безболезненным, но достаточным, чтобы возникающее при этом реальное снижение давления способствовало всасыванию смазывающей среды в зону последующего контакта.

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению степени воздействия УЗК на формирование рельефа обработанной поверхности при наружном точении гаммы материалов: стали марки сталь 45 (рис.5), ШХ15, 12Х18Н9Т; титановые сплавы ВТ5, ВТ10, ОТ-4; латунь ЛС59 и бронза БРАЖ.

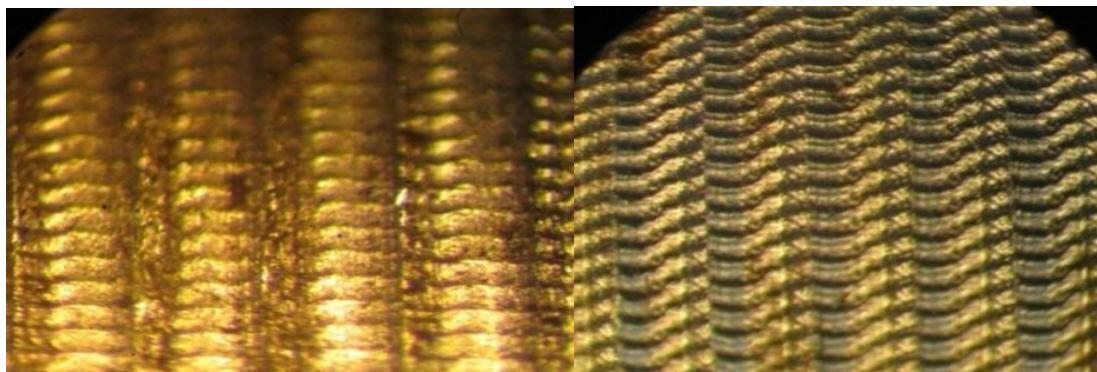


Рис. 5. Обрабатываемый материал – сталь 45, частота УЗК $f = 22$ кГц

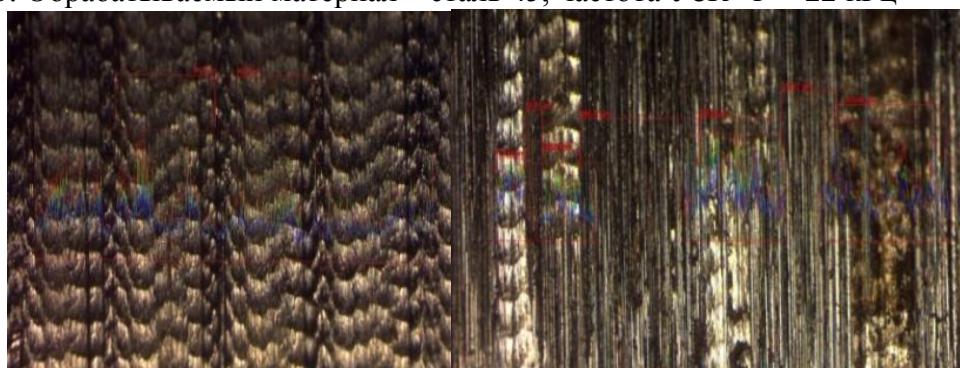


Рис. 6. Обработанные методом УЗ резания поверхности (слева) и те же поверхности после тонкого шлифования и хонингования

Отметим, что рельеф различной конфигурации можно получить УЗ резания, но его нужно в дальнейшем обработать так, чтобы полученная поверхность имела достаточную несущую способность с позиций трения, что и было осуществлено технологией прецизионного шлифования и суперфиниша. Полученные поверхности в какой-то мере удовлетворяли предъявляемым требованиям (рис. 6), но ввиду того, что на отмеченные

технологии необходим определенный допуск на обработку, то пригодными оказались лишь поверхности, полученные с применением высоких амплитуд УЗК выше 6...8 мкм, но ввиду вынужденной переустановки изделия на процесс суперфиниша после токарной обработки наблюдалось изменение симметрии образованных трибологических дорожек. Это привело к необходимости испытать возможность обкатывания обработанных резанием поверхностей цилиндрическим или бочкообразным роликом (рис. 7). Ре-

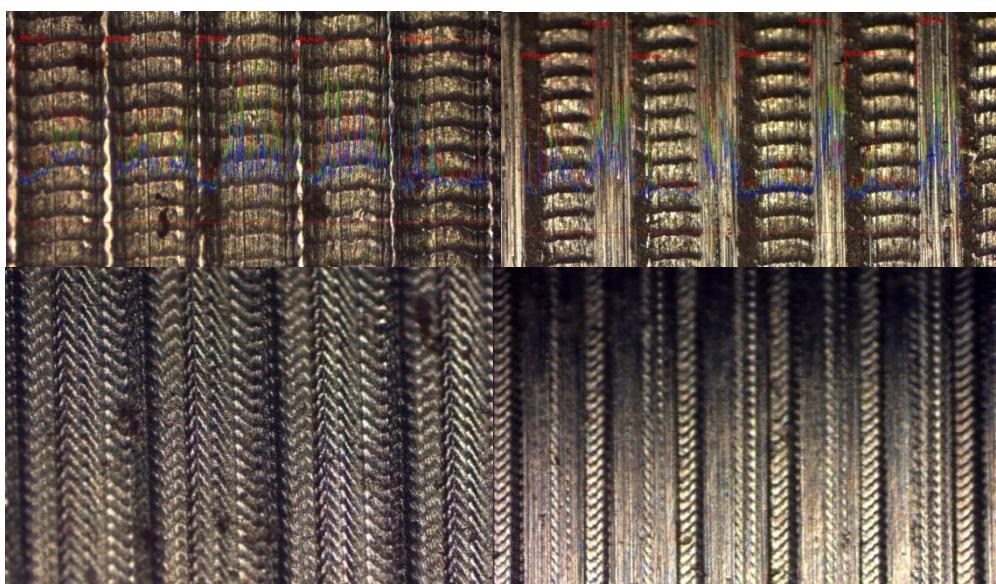


Рис. 7. Образцы после силовой обработки методом радиального УЗ резания (слева) и после обкатки цилиндрическим роликом (справа)

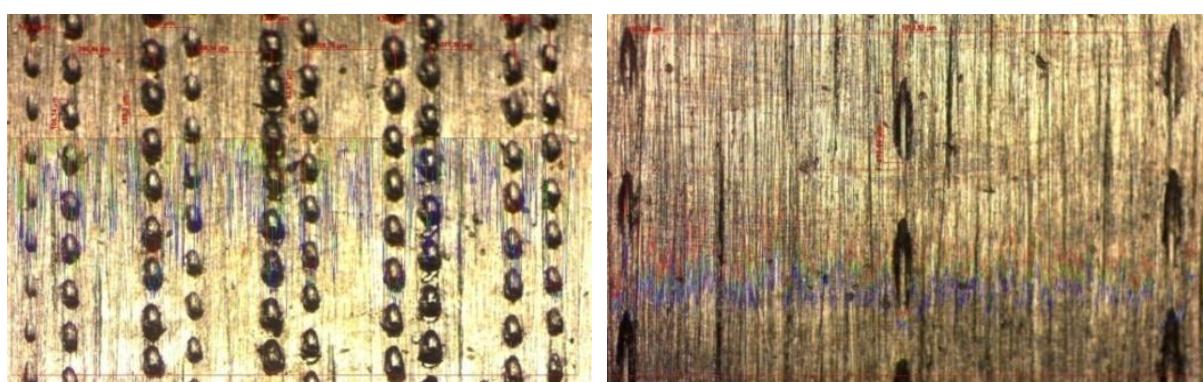


Рис. 8. Образец с двойной дорожкой со смещением, скорость резания средняя (слева); одинарная дорожка, высокая скорость резания. $A=A/2$ (справа)

зультаты оказались предпочтительнее, но сам процесс обкатывания длинных деталей непроизводителен, что с позиций массового производства ДВС мало приемлем.

Выводы

Разработан новый метод формирования трибологических структур на поверхностях пары трения использованием УЗК, с повышенными показателями по смазывающим свойствам, что, в свою очередь, может привести к повышению долговечности и работоспособности пары трения и, более того, позволит создать резерв, допускающий повысить степень точности посадки в паре трения, следовательно, улучшить технические

характеристики современной техники. Нужны дальнейшие исследования на предмет выявления как оптимальных рельефов, так и технологического обеспечения процесса формирования специальной трибологии поверхности.

Полученные в данном исследовании и ранее [2-5] результаты допускают необходимость поиска иных технологических решений с применением УЗК, но уже не мощного как для многих техпроцессов, а “тонкого” с хорошей амплитудой и малыми энергетическими затратами. Такая попытка в исследованиях была осуществлена. На рис. 8 показана поверхность, подвергнутая УЗ резанию после процесса хонингования, т.е. налицо перспективы для разработки новой технологии формирования триботехнических структур на поверхностях трения.

Список литературы:

1. Христафорян С.Ш. Теоретические и технологические основы повышения эффективности обработки материалов использованием УЗК: Автореф. дис. ... д.т.н. / ГИУА. – Ереван, 1996. – 36 с.
2. Изменение условий контактного трения при наложении ультразвуковых колебаний на процесс резания / С.Ш. Христафорян, А.В. Артунян, Г. Пипер и др. // Ереван: Вестник ГИУА. Серия “Механика, машиноведение, машиностроение”. 2013. Вып. 16, № 1. – С. 81-90. ISSN 1829-3387.
3. Предпосылки изменения явлений на передней грани режущего клина от наложения УЗК на резец / С.Ш. Христафорян, Ф. Велцел и др. // Сб. тр. XXI МНТК “Машиностроение и техносфера XXI века”. – Донецк, 2012. – Т. 3. – С. 43-47. ISSN 2079-2670
4. Христафорян С.Ш. Физическая модель пластического деформирования материала в процессах резания // Наукоемкие технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. № 6. – С. 18- 24. ISSN 2223-4608
5. Христафорян С.Ш., Назарян Э.А., Баласанян Б.С. Анализ напряженного состояния контакта по передней грани режущего клина при резании пластичных материалов // Вестник ГИУА. Серия “Механика, машиноведение машиностроение”. – 2012. – Вып. 15, – С. 24-34. ISSN 1829-3387.

Надійшла до редколегії 01.12.2014.

A.L. Arshakjan

ULTRASONIC TECHNOLOGY OF SPECIAL STRUCTURES FORMING ON HONED SURFACES

The theoretical and technological aspects of developing a technology allowing to produce a friction pair surfaces with higher rates of tribological characteristics, in particular, the possibility of improving the penetration of contact lubricants without compromising the accuracy characteristics and the surface quality of the friction pair parts are considered.

Keywords: ultrasound, blade cutting, running, surface relief.

А.Л. Аршакян

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ХОНИНГОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Рассматриваются теоретические и технологические аспекты разработки технологии изготовления поверхностей пары трения с повышенными показателями трибологических характеристик, в частности возможности улучшения условий проникновения в контакт смазывающих веществ без ущерба точностных характеристик и качества поверхностей деталей пары трения.

Ключевые слова: ультразвук, лезвийное резание, обкатка, рельеф поверхности