УДК 621.96

С.Ш. Христафорян, Б.С. Баласанян, Э.С.Христафорян, А.Л. Аршакян
Национальный политехнический университет Армении

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ХОНИНГОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Теоретические и технологические аспекты разработки технологии, позволяющей производить пары трения поверхностей с более высокими трибологическими характеристиками, в частности, возможность улучшения проникновения контактных смазок без ущерба для характеристик точности и качества поверхности трущихся частей.

Ключевые слова: *ультразвук, режущая кромка, рельеф поверхности*

S.Sh. Khristaforyan, B.S. Balasanyan, E.S. Khristaforyan, A.L. Arshakyan

DEVELOPMENT OF ULTRASOUND TECHNOLOGY FORMING TRIBOLOGICAL HONED STRUCTURES 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.*

1. Введение

Развитие современной техники требует повышения точности подвижных соединений, приводящего к улучшению качества обработанных поверхностей. Высокая точность соединения достигается при соответствующих допусках на посадку, что приводит к трудным задачам, связанным с необходимостью изготовления поверхностей малой шероховатости, что возможно применением современных технологий суперфиниша хонингования и размерной полировки. Но эти условия, с одной стороны, приводят к снижению возможности обеспечения смазки поверхностей, а с другой к повышению уровня атомарного взаимодействия поверхностей, приводящего к возникновению оча-гов схватывания, вызывающего быстрый износ поверхностей, т.е. снижаются долговеч-ность и надежность подвижного соединения, а с ней и всей техники. С одной стороны, изготовление подвижного соединения высокого качества обходится весьма дорого, а с другой – его эксплуатация приводит в снижению долговечности средства техники. Отметим, что современные смазывающие вещества эффективны, но их надо привести в подвижное соединение, что не всегда успешно осуществляется ввиду высокой их вязкости. Менее вязкие смазки на поверхности трудно удерживаются, стекают и легко вы-давливаются. То есть, задача сводится к разработке технологий, обеспечивающих возможность формирования на обработанной поверхности трибологического рельефа без ущерба требованиям по точности соединения, т.е. подвижности посадки. Показателен пример сочленения цилиндр - кольцо двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

В этом направлении проведены масштабные исследования и получены определенные результаты. Так, после операций хонингования цилиндра ДВС и последующего микрополирования достигается уровень шероховатости поверхности, который удовлетворяет требованиям по посадке (рис. 1). Затем (университет им. Отто-фон-Герике, руководитель темы проф. Б. Карпушевский, Германия) различными технологиями на готовой поверхности подготавливается специальный рельеф. При

© Христафорян С.Ш., Баласанян Б.С., Христафорян Э.С., Аршакян А.Л.; 2015 г.

этом предпочтение отдается лазерным технологиям и обкатке, имеющие свои недостатки, в первую очередь, по производительности. В нижнем правом углу представлен микрорельеф поверхности, полученный ультразвуковым (УЗ) резанием в ГИУА [1]. Множество микрофотографий поверхностей, обработанных УЗ резанем, явились основой для проведения в рамках гранта Volkswagena исследований по разработке технологии структурирования специальных трибологических структур на обработанной поверхности. По программе исследований предусматривалось исследовать процесс УЗ резания и получить поверхности, которые в дальнейшем, после тонкой абразивной обработки и хонингования сохранят следы от лезвийной обработки и будут обладать лучшими свойствами удерживать смазку и высокой работоспособностью. Схема контакта приведена на рис. 2.

Актуальность задачи не вызывает сомнений, и для машиностроительной науки поиск новых технологических решений формирования специальных трибологических структур на поверхностях деталей высокой точности является необходимым.

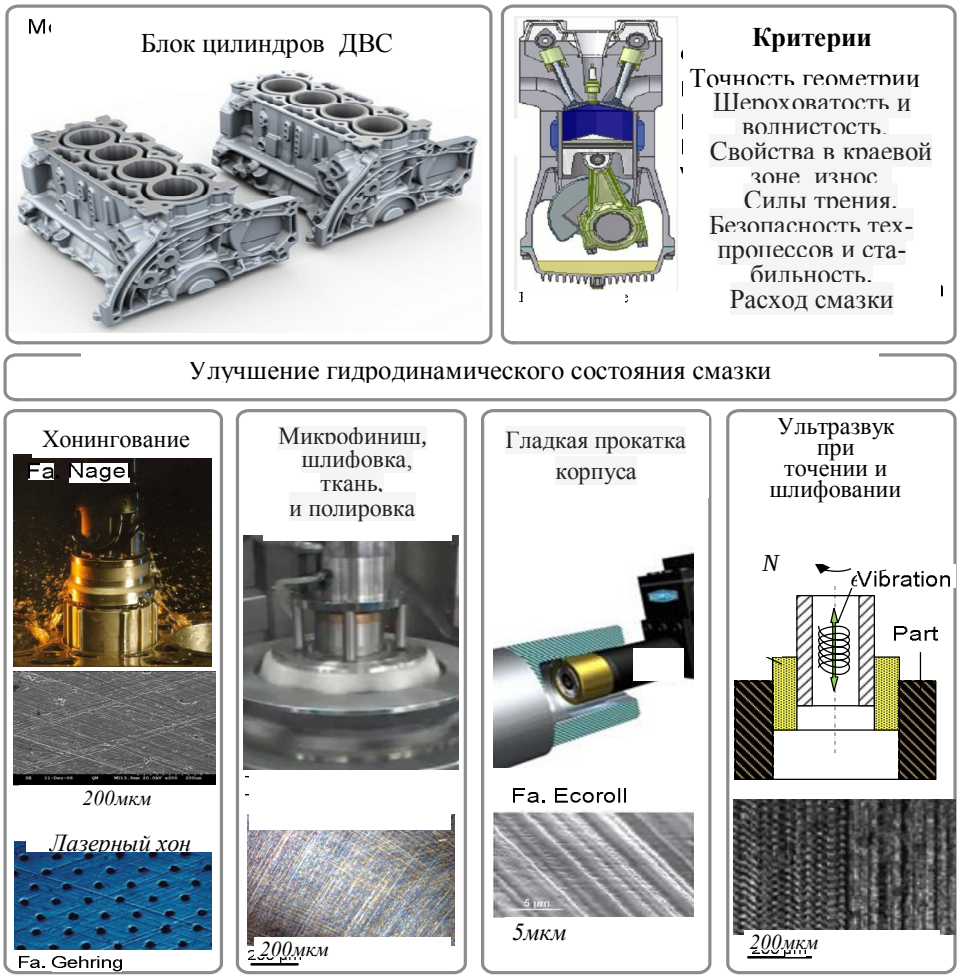

Рис. 1. Некоторые технологические варианты формирования на поверхности специального трибологического рельефа

2. Результаты исследования

Согласно программе договора, предполагались исследования, которые должны были проводиться в лаборатории "Машиностроительные технологии" ГИУА. Задачи исследования по пунктам:

- выявление возможности формирования трибологических стуктур на поверхностях, обработанных способом лезвийного резания;
- 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 стуктур на обработанных поверхностях пары трения.

Согласно пунктам 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 растачиваемого отверстия на величину h_y, т.е. ось крутильных колебаний O_1 выше оси детали O на величину e_z, e_y (рис. 5а). Тогда передний и задние углы будут отличаться от углов заточки. Воспользуемся принципами ортогонального проектирования [1] и определим угол корректировки σ_N. Заметим, что величина σ_N не постоянна, так как истинная величина вектора $\vec{V}$ состоит из трех составляющих:

- вектор скорости вращательного движения $\vec{V}^b = 2\pi\rho n\ [мм/мин]$; (1)
- вектор скорости подачи режущего клина $\vec{V}^S = nS\ [мм/мин]$; (2)
- вектор скорости УЗК режущего клина $\vec{V}^k = \tau_a \omega \rho_k cos\omega t/60\ [рад/мин]$, (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 – 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:

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

На основе (рис. 5. б, г) и зависимостей (2.1) – (2.3) имеем:

$$\varepsilon_{11} = arcsin\, h/\rho = arcsin\left(h_y + l \cdot sin\lambda\right)/\rho,\qquad V_{11}^b = V^b \cdot cos\varepsilon_{11},\ V_1^b = V^b \cdot sin\varepsilon_{11}, \tag{5}$$

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

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

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

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

$$V_2^S = V^S cos\varphi,\qquad V_3^S = V^S sin\varphi,$$

$$V_5^S = V_2^S cos\lambda = V^S cos\varphi \cdot cos\lambda,\quad V_5^S = V_2^S cos\lambda = V^S cos\varphi \cdot cos\lambda, \tag{7}$$

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

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

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

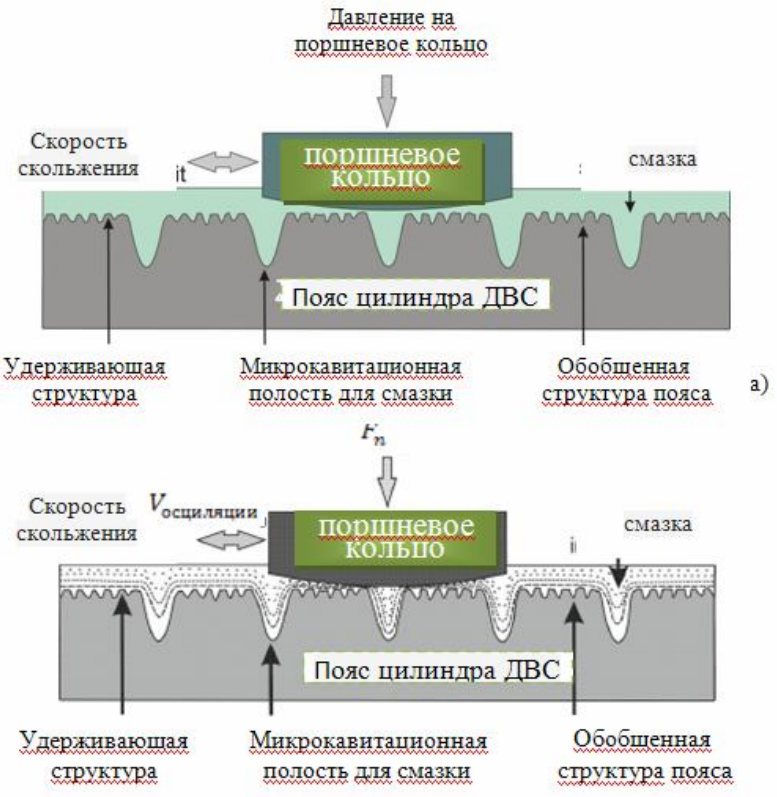

Рис. 2. Схемы контакта цилиндра с трибологическим рельефом и поршневого кольца, имеющего бочкообразность, позволяющую за счет кавитационных явлений выдавливать смазку в зону контакта

$$V_6^b = V_2^b \cdot sin\lambda = V^b \cdot sin\varepsilon_{11} \cdot sin\varphi \cdot sin\lambda, V_8^b = V_{11}^b \cdot cos\lambda = V^b \cdot cos\varepsilon_{11} \cdot cos\lambda.$$
$$V_2^S = V^S cos\varphi, \quad V_3^S = V^S sin\varphi,$$
$$V_5^S = V_2^S cos\lambda = V^S cos\varphi \cdot cos\lambda, \quad V_5^S = V_2^S cos\lambda = V^S cos\varphi \cdot cos\lambda, \quad (7)$$

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

$$\rho_k = (\rho \cdot cos\varepsilon_{11} - e_y)/cos\,\mu_{11}, \quad \mu_{11} = arctg[(h - e_z)/(\rho \cdot cos\varepsilon_{11} - e_y)], \quad (8,9)$$
$$tg\tau = a/\rho_k = Asin\omega t/\rho_k \Rightarrow \tau = arctg(Asin\omega t/\rho_k). \quad (10)$$

Следовательно, имеем:

$$V_{11}^k = V^k cos(\mu_{11} + \tau), \quad V_1^k = V^k sin(\mu_{11} + \tau),$$
$$V_2^k = V_1^k sin\varphi = V^k sin(\mu_{11} + \tau) sin\varphi, \quad V_3^k = V_1^k cos\varphi = V^k sin(\mu_{11} + \tau) cos\varphi$$
$$V_5^k = V_2^k cos\lambda = V^k sin(\mu_{11} + \tau) sin\varphi cos\lambda, \quad V_6^k = V_2^k sin\lambda = V^k sin(\mu_{11} + \tau) sin\varphi sin\lambda,$$
$$V_7^k = V_{11}^k sin\lambda = V^k cos(\mu_{11} + \tau) sin\lambda, \quad V_8^k = V_{11}^k cos\lambda = V^k cos(\mu_{11} + \tau) cos\lambda. \quad (11)$$
$$V_9 = V_8^b + V_8^k + V_6^k - V_6^b - V_6^S, \quad V_{10} = V_3^S - V_3^k - V_3^b,$$
$$V_N = V_{10}/sin\sigma_N, \quad V_T = V_5^b + V_5^S + V_7^b + V_5^k + V_7^k. \quad (12,13)$$
$$V_{10} = V^S sin\varphi - V^k sin(\mu_{11} + \tau) \cdot cos\varphi - V^b sin\varepsilon_{11} \cdot cos\varphi = \quad (14)$$
$$= S \cdot n \cdot sin\varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot sin\varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot cos\omega t \cdot sin(\mu_{11} + \tau)/60] cos\varphi.$$

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

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

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

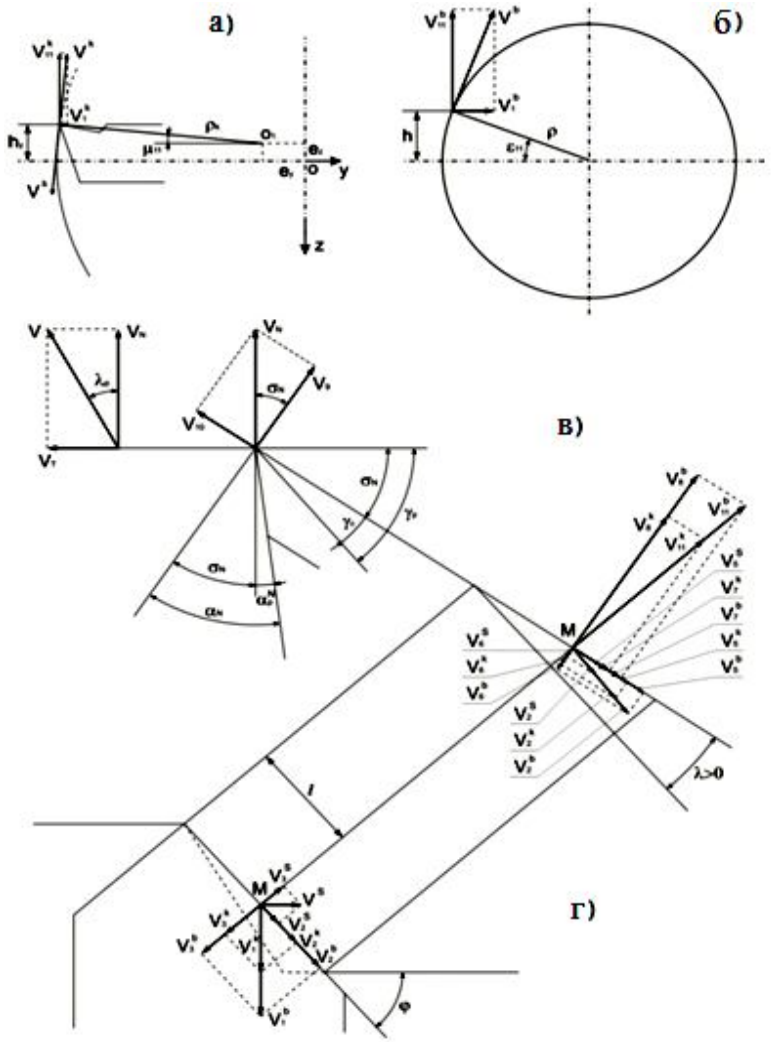

Рис. 3. План скоростей, когда ось колебательных движений в первой четверти поперечного сечения обрабатываемой поверхности

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

$$V_T=V^b sin\varepsilon_{11}\cdot sin\varphi\cdot cos\lambda+V^S cos\varphi\cdot cos\lambda+V^b cos\varepsilon_{11}\cdot sin\lambda+$$

$$+V^k sin(\mu_{11}+\tau)\cdot sin\varphi\cdot cos\lambda+V^k cos(\mu_{11}+\tau)\cdot sin\lambda=$$

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

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

На основе этих зависимостей преобразуем (4), тогда:

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

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

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 положительному 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).

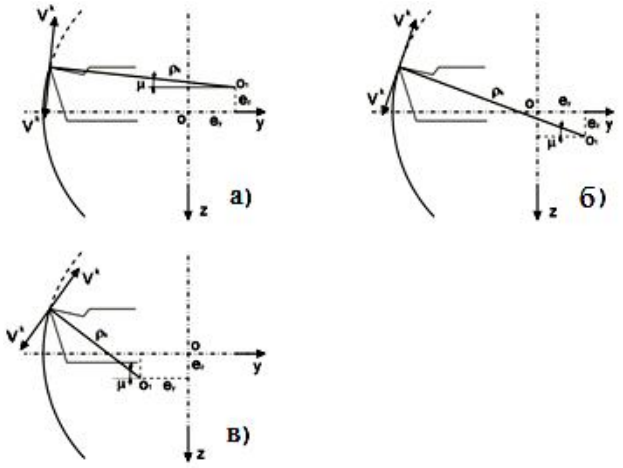

Рис.4. Варианты расположения оси колебаний в координатах отверстия

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

- 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 отрицательным углом λ – иную схему;

- с этих же позиций установление резца ниже оси вращения детали целесообразнее, чем установление выше отмеченной оси;

- 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.

Отмеченное подтверждает рост эффективности процесса растачивания, повышение показателей качества поверхности, улучшение динамических показателей процесса резания при наложении на нее крутильных колебаний.

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 σ_N, 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.

В случае наложения на процесс растачивания крутильно-осевых УЗК сделаны следующие выводы:

- вектор скорости УЗК переменен в данной точке режущего лезвия клина по направлению и величине, и это имеет место 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 крутильного движения и скорости резания возможны условия, когда передняя грань клина будет отрываться от корня стружки, что, с одной стороны, явно 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, ШХ15, 12Х18Н9Т; титановые сплавы ВТ5, ВТ10, ОТ-4; латунь ЛС59 и бронза БРАЖ. На рис. 5 приведены микрофотографии обработанных поверхностей для стали сталь 45.

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.

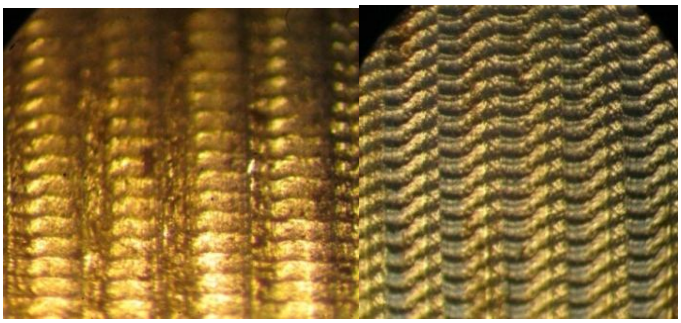

Рис. 5. Обрабатываемый материал – сталь 45, частота УЗК f = 22 кГц

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, полученые с приме-

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

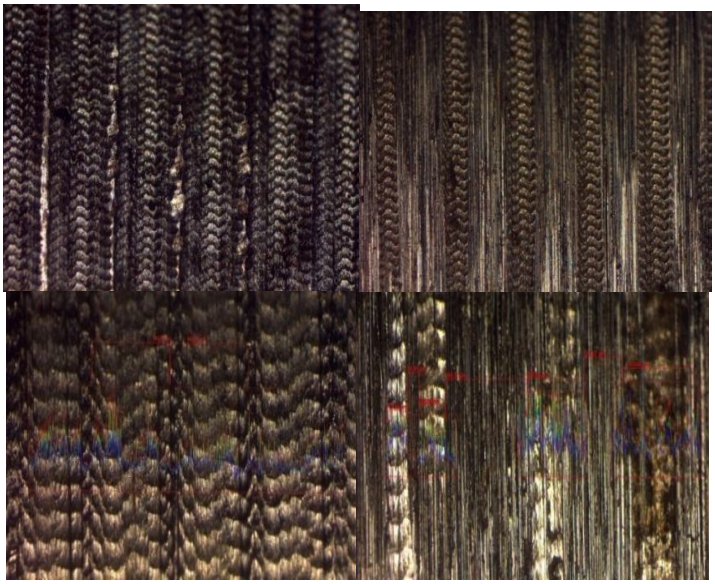

Рис. 6. Обработанные методом УЗ резания поверхности (слева) и те же поверхности после тонкого шлифования и хонингования

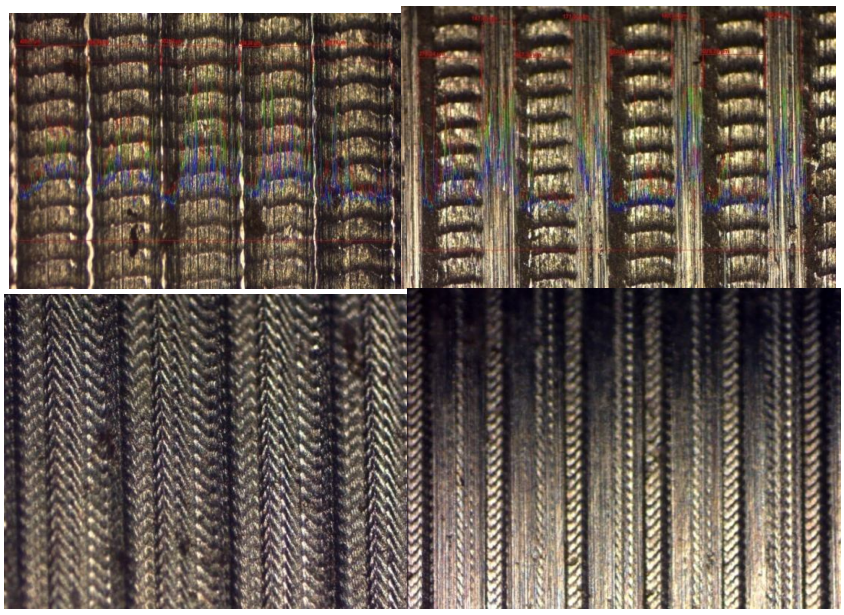

Рис. 7. Образцы после силовой обработки методом радиального УЗ резания (слева) и после обкатки цилиндрическим роликом (справа)

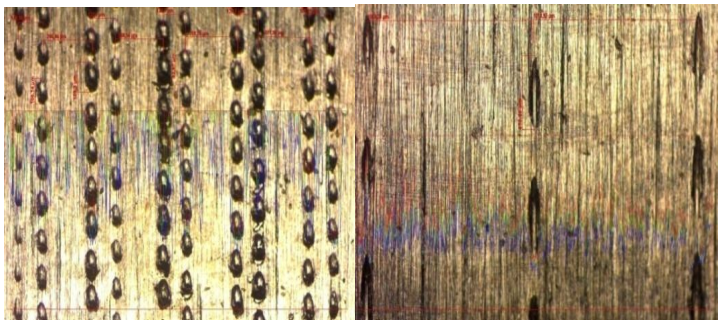

Рис. 8. Образец с двойной дорожкой со смещением, скорость резания средняя (слева); одинарная дорожка, высокая скорость резания. A=A/2 (справа)

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 УЗК как для многих техпроцессов, а "тонкого" УЗК с хорошей амплитудой и малыми энергетическими затратами. Такая попытка в исследованиях была осуществлена. На рис. 10 показана поверхность, подвергнутая УЗ резания после процесса хонингования, т.е. налицо перспективы для разработки новой технологии формирования трибологических 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 уль-тразвуковых колебаний на процесс резания / С.Ш. Христафорян, А.В. Артунян, Г. Пипер и др. // Вестник ГИУА. Серия "Механика, машиноведение, машинострение". – 2013. – Вып. 16, № 1. – С. 81-90.

3. Предпосылки изменения явлений на передней грани режущего клина от наложения УЗК на резец / С.Ш. Христафорян, Г-Ю. Пиппер, Ф. Велцел и др. // Сб. тр. XXI МНТК "Машиностроение и техносфера XXI века". – Донецк, 2012. – Т. 3. – С. 43-47.

4. Христафорян С.Ш. Физическая модель пластического деформирования материала в процессах ре-зания // Наукоемкие технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – № 6. – С. 18- 24.

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.

Поступила в редколлегию 24.05.2015