

неровностей деталей практически отсутствует, так как впадины между выступами шероховатостей поверхности заполнены веществом, обладающим свойствами смазки и способностью нести нагрузку, сервовитной пленкой. Кроме того, это вещество не уносится из зоны трения, а лишь поступает туда и удерживается там, т.е. обладает свойствами сохранности. Именно такой многофакторной защитой отличается от других видов трения явление избирательного переноса.

Действительно, при ИП сервовитная пленка исключает взаимодействие шероховатостей поверхностей, а электрический заряд частиц износа возвращает их в зону, контактного взаимодействия.

Необходимы также меры против окисления металлов, так как окисные пленки, разрушаясь при трении, составляют часть расхода металлов на износ. В режиме трения при ИП это достигается восстановительным характером химических процессов при трении. При ИП преодолеваются так же трудности, связанные с термической нестабильностью смазок и металлов. Это осуществляется за счёт усиленной интенсификации окислительных процессов продуктов трибодеструкции смазки и восстановлением окисных пленок меди до металла. Тогда создается возможность хемосорбции окисленных продуктов, образующихся в результате трибодеструкции смазочного материала на восстановленном металле с образованием комплексных соединений.

Свободное комплексное соединение (соединение, находящееся в масле) работает как ПАВ, в хемосорбированном виде оно создает прочный термодинамический защитный слой и, наконец, способствует обмену веществом сервовитной пленки со средой, хемосорбируясь на атомах со свободными связями, образующимися у выхода дислокаций. Таким образом, оно выполняет тройную функцию. Именно такой многофакторной защитой можно предотвратить многие процессы и явления, происходящие при трении, снизить износ деталей, повысить долговечность и ресурс сопряжений.

Список литературы:

- [1] Сорокин В.М., Курников А.С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин. Н.Новгород: Издательство ВГАВТ. 2006-292с.
- [2] Сорокин В.М., Тудакова Н.М. Анализ причин отказов деталей механических систем самолётов и пути обеспечения их долговечности./Наука производству. Современные задачи управления, экономики, технологии и экологии в машино и приборостроении: Матер. Всерос. Науч.-техн. конф. Арзамас: АФНГТУ. 1998-с. 63–65.
- [3] Сорокин В.М., Танчук С.С., Зотова В.А., Михеев А.В. Влияние финишной обработки отверстий на триботехнические характеристики соединений. Журнал РВМ. 2011, №6. с. 29–34.

В.М. Сорокин
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

СОВРЕМЕННАЯ ТРИБОЛОГИЯ И ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ИЗНОСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН

Практика показывает [1,2 и др.], что основной причиной выхода из строя большинства узлов трения (до 90%) является преждевременный их износ. Большие расходы на ремонт машин, составляющие десятки миллиардов рублей в год, огромная его трудоёмкость определяют экономическую значимость проблемы износа.

Стремление повысить надёжность и долговечность машины привело специалистов-машиностроителей обратить своё внимание на подвижные, а также неподвижные сопряжения, бесперебойная работа которых связана с нормальным протеканием цело-

го комплекта явлений и процессов, изучающих современной трибологией, или триботехникой.

За последние десятилетия И.В. Крагельским и его учениками выполнены фундаментальные работы, вскрывшие особенности фрикционного взаимодействия твёрдых тел при трении. Наиболее важными положениями этих работ [3,4, стр. 142], характеризующих фрикционный контакт при трении, являются следующие.

1. Двойственная молекулярно-механическая, или адгезионно-деформационная природа внешнего трения. Она обусловлена как преодолением молекулярного взаимодействия между сближенными поверхностями (в пределе – это «мостики сварки»), так и упругим или пластическим деформированием поверхностных слоёв.

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + K \cdot \alpha_r \cdot \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (1)$$

где: τ_0 и β – параметры уравнения; $\tau = \tau_0 + \beta \cdot p_r$, характеризующие сдвиговое сопротивление молекулярной связи τ ;

p_r – фактическое давление;

K – коэффициент, характеризующий форму неровностей и распределение их по высоте $K=0,5$;

α_r – коэффициент гистерезисных потерь; $\alpha_r = 2,2\alpha$,

где α – гистерезисные потери при объёмном деформировании;

h/R – относительное внедрение единичной неровности.

На каждом пятне касания соблюдается элементарный закон трения (1). Параметры τ_0 и β , характеризующие сдвиговое сопротивление молекулярных связей, определяются экспериментально, при этом условия эксперимента воспроизводят напряжённое состояние на реальном пятне касания.

2. Правило положительного градиента сдвигового сопротивления. Для обеспечения внешнего трения процессы взаимодействия контактирующих неровностей должны быть сосредоточены как можно ближе к поверхности твёрдого тела. Это положение можно пояснить неравенством (2), определяющим «порог внешнего трения»

$$\frac{h}{R} \geq \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{G_T} \right), \quad (2)$$

В связи с этим, обязательным условием внешнего трения является формирование на поверхностях твёрдого тела тонкого слоя, менее прочного, чем глубже лежащий слой. Изменённый тонкий поверхностный слой назван «третьим телом» [4]. Им могут быть различной природы пленки, изменённая по сравнению с объёмом материалов структура тонкого поверхностного слоя. Изменение знака градиента приводит к задиру поверхностей трения.

3. Формирование на поверхности трения некоторой «равновесной» шероховатости является 3-м положением. Внешнее трение невозможно для идеально гладких поверхностей, так как в зону контакта не будет поступать окружающая среда (возникнет так называемое плёночное голодание), необходимая для формирования третьего тела. Трение также невозможно для очень шероховатых тел, так как вместо скольжения будет зацепление (речный эффект), поэтому шероховатость должна иметь некоторое промежуточное состояние.

Учёт этих 3-х положений, позволил [2] разработать молекулярно-механическую теорию трения, усталостную теорию износа, а также открыть эффект избирательного

переноса, обеспечивающего в благоприятных условиях практически безызносное трение.

В соответствии с законами неравновесной термодинамики стационарные процессы, протекающие на фрикционном контакте, стремятся к минимуму производства энтропии, т.е. в системе должен реализоваться минимальный коэффициент трения. Поэтому шероховатость будет изменяться до тех пор, пока не будет соответствовать минимуму на кривой коэффициент трения – шероховатость.

На высокой и острой микронеровности плёнка также интенсивно изнашивается за счёт её продавливания под действием высоких напряжений на единичном контакте. Промежуточные по высоте и геометрическому очертанию неровности достаточно прочно удерживают смазочную плёнку, и такие неровности будут превалирующими в общем ансамбле неровностей после завершения процесса приработки. Величина образовавшейся равновесной шероховатости вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta_{\text{равн}} = \frac{16 \cdot \tau_0^{1,25} \cdot E^{0,75}}{\alpha_c^{1,25} \cdot p_c^{0,5}}$$

где: p_c – контурное давление. $\Delta_{\text{равн}} = R_{\text{max}}/R \cdot b^{1/\nu}$ – комплекс параметров шероховатости – обобщённая характеристика шероховатости, объединяющая эксплуатационные свойства шероховатости (см. табл. 1).

Равновесная шероховатость зависит от сдвигового сопротивления молекулярной связи τ_0 , модуля упругости деформируемого тела E и контурного давления p_c . Промежуточная плёнка смазки, выступая в роли третьего тела, является не только защитным слоем, но и фактором, создающим шероховатость (например, притирочные пасты в процессе полирования зеркальных поверхностей). Аналитический прогноз величины «равновесной шероховатости» выявляет большие технологические возможности управления качеством поверхности и обеспечения необходимой долговечности сопряжений по износу. Табл. 1 позволяет технологу назначать необходимый вид технологической операции (оптимальную шероховатость), наиболее близкой по параметру Δ к равновесной шероховатости, что значительно сокращает величину приработочного износа и время приработки.

На рис. 1 показана диаграмма, позволяющая представить три наиболее характерных периода изнашивания и изменения зазора в сопряжении охватываемая (кривая 1) – охватываемая (кривая 2) детали (втулка-вал) в зависимости от продолжительности работы. Зазор от S_n – начального, который назначается конструктором, изменяется до S_n – зазора после периода приработки (1), при этом происходит макро- и микрогеометрическая приработка поверхностей трения деталей, причём наибольшие изменения претерпевает более мягкая из сопряженных поверхностей. Её шероховатость изменяется до некоторого равновесного состояния, характерного для данных конкретных условий упругого контакта. Этот период условно можно разделить на приработку начальную (1_а) и окончательную (1_б).

Второй период (II) характеризуется стабильным или нормальным изнашиванием и называется эксплуатационным или рабочим. Его также условно можно разделить на (II_а) – изнашивание с замедленной скоростью и (II_б) – изнашивание с увеличенной скоростью. В этом периоде происходит постепенное с умеренным ускорением изнашивание поверхностей деталей с увеличением зазоров в сопряжении до величины S_d – допустимого для эксплуатации в течении предстоящего межремонтного периода (период II_а) и затем до предельного зазора $S_{\text{пр}}$ (период II_б) при котором эксплуатация сопряжения становится технически ненадёжной или экономически нецелесообразной.

В третьем периоде (III) предельного изнашивания происходит прогрессирующее или катастрофическое изнашивание, когда изнашивание поверхностей деталей резко возрастает, что может привести к их разрушению. В этом периоде детали изнашиваются на величину критического износа ($I_{кр}$), а сам процесс изнашивания так же условно делится на ускоренное изнашивание (III_a) до критического износа и изнашивание (III_b) после критического износа.

Диаграмма изнашивания (рис. 1) деталей отображает обобщённую физическую модель износа в зависимости от многих факторов: нагрузки на сопряжение, относительной скорости взаимного смещения поверхностей и температуры в зоне контакта трущихся деталей, формы зоны контакта, вида трения, вида и свойств смазочного материала и др. Изменение каждого из этих факторов может привести к изменению интенсивности изнашивания. В связи с этим к ним предъявляются определённые требования. Например, к смазочным материалам, снижающим силы трения и износ поверхностей трения, амортизирующим ударные нагрузки, охлаждающим детали и защищающим их от коррозии предъявляются требования, также по безопасности жизнедеятельности [2, 3]: они не должны быть токсичными, взрывоопасными, не должны повреждать уплотнительные и герметизирующие и др. материалы. По своему физическому состоянию они классифицируются на жидкие (масла), пластичные, твёрдые, и газообразные. К ним относятся также консистентные масла, рабочие жидкости для гидравлических систем и смазочно-охлаждающие технологические жидкости (СОТС, СОЖ). При выборе смазочных материалов учитывают их трибологические свойства (смазочная способность, маслянистость, плотность, вязкость и др.) [1, 5]. Так увеличение вязкости моторных смазочных материалов снижает износ деталей ДВС, а масла малой вязкости обеспечивают меньший износ при запуске двигателя и меньшие энергетические потери.

Большой вклад в развитие трибологии, изучение процессов изнашивания, внесли учёные нашей страны. Только в последние десятилетия Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским открыт эффект избирательного переноса при трении («эффект безызносности»). Сущность этого явления заключается в самопроизвольном образовании тонкой плёнки меди в парах трения бронза-сталь при смазывании их спиртоглицериновой смесью. Плёнка меди толщиной 1...2 мкм в процессе трения покрывает как бронзу, так и сталь. Она резко снижает износ узла трения и уменьшает силу трения примерно в 10 раз. Подобное явление было обнаружено так же в парах трения сталь-бронза при смазывании смазкой ЦИАТИМ-201 (в шарнирно-болтовых соединениях самолётов), в паре сталь-сталь в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании маслофреоновой смесью. А.А. Поляковым, Д.Н. Гаркуновым, Г.П. Шпеньковым, В.Я. Матюшенко выявлен ранее неизвестный дефект, состоящий в разрушении поверхностей различных материалов при трении и установлен механизм водородного изнашивания (открытие за №378, зарегистрированное в 1990 г), которое возникает в результате кооперативного (синергетического) взаимодействия поверхностных явлений: экзотермии, адсорбции и трибодеструкции, приводящих к выделению водорода. Кроме того, возникающие при деформации поверхностного слоя металла неравновесные процессы создают в процессе трения тепловые градиенты, электрические и магнитные поля и поля напряжений. Все это приводит к диффузии водорода в металл, концентрации его в подповерхностном слое и ускоренному износу или разрушению этого слоя [1]. В настоящее время исследования в данных областях трения направлены на разработку эффективных методов их технологического обеспечения (процессы ФАБО, КАУО, или КАДО [1, 5].).

Многие изделия в большинстве случаев теряют работоспособность вследствие отката (износа) одной или нескольких деталей. Так для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), дизелей различных машин (автомобилей, тракторов, судов и другой техники) лимитирующими являются детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и др. Их износ определяет ресурс двигателя до

капитального ремонта. При эксплуатации для разных двигателей характерны большие колебания величин износа, что обусловлено различным качеством их изготовления (технологический фактор) и различными условиями эксплуатации и обслуживания (эксплуатационный фактор).

Детали ЦПГ подвергаются коррозионно-механическому водородному, абразивному изнашиванию, причем, согласно последним исследованиям, ведущим видом изнашивания этих деталей является абразивное и сопутствующее ему водородное. Наряду с абразивным, водородным коррозионно-механическим изнашиванием в местах, где нарушается непрерывная масляная пленка (в верхней части цилиндра), возможно схватывание, а в отдельных случаях – даже появление задиров.

Водородное и коррозионно-механическое изнашивание деталей ЦПГ вызывается наличием в зоне трения агрессивных веществ – газообразных и жидких продуктов сгорания топлива и окисления масел, что в сочетании с высокой температурой ведет к образованию водорода, непрочных пленок окислов и их последующему удалению. Коррозии и сопутствуют и электрохимические процессы.

Абразивное изнашивание деталей ЦПГ в основном вызывается абразивными частицами минерального происхождения, проникающими в цилиндр с воздухом, топливом и смазочным материалом. Цилиндры изнашиваются неравномерно как по их образующей, так и в поперечном сечении.

Неравномерность износа цилиндров в поперечном сечении зависит от направления потока горючей смеси, ее загрязненности, неравномерности температуры цилиндров по окружности, давления поршневых колец, деформации цилиндра и т.д.

Зона наибольшего износа обычно расположена в стороне, противоположной впускному каналу. В плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала, износ обычно больше в 1,1–1,6 раза, чем в плоскости параллельной оси коленчатого вала.

Максимальный износ по образующей цилиндра (гильзы) наблюдается в месте остановки первого компрессионного кольца при положении поршня в верхней мертвой точке (в. м. т.).

Иногда для повышения износостойкости цилиндра в него запрессовывают вставку из нерезистивного чугуна. В этом случае профиль износа цилиндра имеет два пика: в месте остановки первого компрессионного кольца в в. м. т. и в зоне перехода материала вставки в материал цилиндра.

Поршневые кольца изнашиваются в радиальном направлении и по высоте. Наибольший износ в радиальном направлении имеют концы колец у стыка. По высоте кольца изнашиваются примерно одинаково по всему периметру. Максимальный износ имеют в наиболее тяжелых условиях (высокие давления и температуры, плохая смазка). Вторые и третьи компрессионные кольца, а также масло-съемные кольца изнашиваются меньше.

В поршнях наиболее изнашиваемым элементом является канавка под верхним компрессионным кольцом, остальные элементы поршня, в том числе юбка, изнашиваются незначительно. Изнашивание канавки поршня и кольца носит преимущественно абразивный характер, однако действие окислительной среды отработавших газов и высокой температуры существенно повышает возможность водородного изнашивания. Особенно высока интенсивность абразивного изнашивания канавки поршня и кольца при высокой запыленности окружающего воздуха и неудовлетворительной очистке его перед поступлением в цилиндр. В результате износа компрессионных колец и канавок поршня уменьшается компрессия и увеличивается прорыв газов из цилиндра в картер, что резко ухудшает работу двигателя.

Износ поршневого пальца, отверстий в верхней головке шатуна и в бобышке поршня в современных двигателях относительно невелик, и долговечность этих сопряжений обычно не лимитирует срок службы цилиндропоршневой группы.

Детали КШМ (подшипники скольжения, шейки коленчатого вала) работают в условиях гидродинамической смазки. Однако при холодных пусках двигателя из-за не-

достаточной смазки возникает режим граничной смазки и даже сухого трения, что ведет к интенсивному водородному изнашиванию. Кроме того, в подшипниках коленчатого вала из-за наличия в масле абразивных частиц происходит абразивное изнашивание.

У двигателей с рядным расположением цилиндров коренные шейки обычно изнашиваются меньше (на 25–50%), чем шатунные, у V-образных двигателей коренные шейки изнашиваются больше, чем шатунные (в 1,5–2,0 раза).

У всех двигателей в шатунных подшипниках верхние вкладыши изнашиваются больше нижних, а в коренных подшипниках – наоборот.

По окружности шейки коленчатого вала и вкладыши изнашиваются неравномерно, обычно максимальный износ шатунных шеек и вкладышей наблюдается со стороны, обращенной к оси коленчатого вала, а коренных шеек и вкладышей – со стороны противовесов.

Неравномерность износа подшипников скольжения кривошипно-шатунного механизма снижает их долговечность и может явиться фактором, лимитирующим долговечность всего двигателя.

В газораспределительном механизме изнашиваются следующие сопряжения: кулачок – толкатель, клапан – седло, стержень клапана – направляющая втулка, шейка распределительного вала – подшипник. Наибольший износ имеют первые две пары.

Пара кулачок – толкатель характеризуется высокими удельными давлениями и относительно высокими скоростями скольжения. Изнашивание этого сопряжения носит преимущественно водородный и усталостный характер, однако может происходить и задир поверхностей, а также абразивное изнашивание частицами, поступающими с маслом. На износ пары кулачок – толкатель очень сильно влияет сорт и качество масла, а также надежность системы смазки.

Износ пары клапан – седло определяется высокими температурами, высокими давлениями и ударным характером приложения нагрузки. Обычно на изношенных поверхностях этого сопряжения наблюдается водородное и усталостное выкрашивание, прогорание клапана.

Основной вид изнашивания прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей – абразивное и водородное. Сопутствующими видами изнашивания являются схватывание и задир поверхностей трения, гидроабразивное и кавитационное изнашивание. Абразивное изнашивание деталей плунжерной пары вызывается твердыми посторонними частицами, содержащимися в топливе. При этом, как правило, износ плунжера (подвижная деталь сопряжения), существенно больше износа втулки (неподвижная деталь) нагнетательный клапан изнашивается по запорному конусу, разгрузочному пояску и направляющему хвостовику, седло клапана – по отверстию. Для этой пары основным видом изнашивания является абразивное. Аналогичный характер изнашивания имеют игла и корпус распылителя, причем у этой пары абразивное изнашивание в отдельных случаях сопровождается схватыванием поверхностей.

В результате износа прецизионных деталей топливной аппаратуры увеличиваются зазоры, изменяются параметры топливоподачи, которые в свою очередь влияют на снижение характеристик работы всего дизельного двигателя.

Анализируя процессы изнашивания, возникающие при трении деталей двигателя и других изделий [5, 6] можно заключить, что основными факторами, определяется износ трущихся поверхностей являются следующие [1, 5–7]:

- внедрение отдельных участков поверхности одной детали в сопряженную поверхность другой; при скольжении это вызывает образование неровностей поверхностей и при многократном воздействии их разрушение;
- адгезионное схватывание, приводящее к переносу материала одной детали на другую и усиление изнашивания;
- наводороживание поверхностей трения деталей; это ускоряет изнашивание в зависимости от условий работы трущихся деталей более чем в 10 раз.

– пластические деформации, приводящие к наклепу поверхностей и разрушению микронеровностей;

– окислительные процессы образующиеся при трении окисные плёнки; хотя они препятствуют схватыванию и глубинному вырыванию, но разрушаются быстро из-за их хрупкости;

В связи с перечисленными факторами защита от износа должна быть многофакторной. Применение для защиты от изнашивания только смазки хотя и предохраняет от схватывания (не весьма надёжно), но не спасает от взаимного внедрения неровностей, пластического деформирования, окисления и разрушения окисных пленок и других необратимых процессов.

Разрушение поверхностей деталей, может происходить и без разрыва тонкой пленки смазки в результате многократного взаимодействия шероховатостей поверхности. Переход к гладкой поверхности при граничной смазке вызывает масляное голодание и схватывание в зоне контакта [1, 7].

При избирательном переносе защитные системы построены по принципу избыточности, так как сервовитная пленка поглощает деформацию, а взаимное внедрение неровностей деталей практически отсутствует, так как впадины между выступами шероховатостей поверхности заполнены веществом, обладающим свойствами смазки и способностью нести нагрузку, – сервовитной пленкой. Кроме того, это вещество не уносится из зоны трения, а лишь поступает туда и удерживается там, т.е. обладает свойствами сохранности. Именно такой многофакторной защитой отличается от других видов трения явление избирательного переноса.

Действительно, при ИП сервовитная пленка исключает взаимодействие шероховатостей поверхностей, а электрический заряд частиц износа возвращает их в зону, контактного взаимодействия.

Необходимы также меры против окисления металлов, так как окисные пленки, разрушаясь при трении, составляют часть расхода металлов на износ. В режиме трения при ИП это достигается восстановительным характером химических процессов при трении. При ИП преодолеваются так же трудности, связанные с термической нестабильностью смазок и металлов. Это осуществляется за счёт усиленной интенсификации окислительных процессов продуктов трибодеструкции смазки и восстановлением окисных пленок меди до металла. Тогда создается возможность хемосорбции окисленных продуктов, образующихся в результате трибодеструкции смазочного материала на восстановленном металле с образованием комплексных соединений.

Свободное комплексное соединение (соединение, находящееся в масле) работает как ПАВ, в хемосорбированном виде оно создает прочный термодинамический защитный слой и, наконец, способствует обмену веществом сервовитной пленки со средой, хемосорбируясь на атомах со свободными связями, образующимися у выхода дислокаций. Таким образом, оно выполняет тройную функцию. Именно такой многофакторной защитой можно предотвратить многие процессы и явления, происходящие при трении, снизить износ деталей, повысить долговечность и ресурс сопряжений.

Список литературы:

- [1] Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Издательство МСХА, 2003. -344с.
- [2] Трение, изнашивание и смазка: Справочник/Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына. М.:Машиностроение т.2.1979-358с.
- [3] Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1984-280 с.
- [4] Научные проблемы машиностроения. /Под ред. К.В. Фролова, М.К. Ускова М.: Издательство Наука 1988-319 с.
- [5] Сорокин В.М., Курников А.С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин. Н.Новгород: Издательство ВГАВТ. 2006-292с.

[6] Сорокин В.М., Тудакова Н.М. Анализ причин отказов деталей мехпнических систем самолётов и пути обеспечения их долговечности./Наука производству. Современные задачи управления, экономики, технологии и экологии в машино и приборостроении: Матер. Всерос. Науч.-техн. конф. Арзамас: АфНГТУ. 1998-с63-65.

[7] Сорокин В.М., Танчук С.С., Зотова В.А., Михеев А.В. Влияние финишной обработки отверстий на триботехнические характеристики соединений. журналРВМ. 2011, №6-с. 29-34

В.М. Сорокин, А.В. Михеев, В.В. Берглезов
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Основной задачей технологии металлообрабатывающего производства является изготовление деталей с наименьшими затратами, наибольшими производительностью и качеством поверхности и поверхностного слоя. При этом качество должно удовлетворять условиям эксплуатации [1, 2]. Детали машин, как правило, с заданными чертежом размерами и необходимыми характеристиками качества поверхности: шероховатости (R_a , R_z , t_p и др.) твердости (HV, σ_b) получают резанием, поверхностным пластическим деформированием (ППД). Однако, для обеспечения требуемых характеристик микрорельефа, физико-механических свойств, а также снижения трудозатрат, повышения производительности целесообразно применять способы совмещенной комбинированной обработки (СКО) с использованием операций резания, ППД, нанесения антифрикционных и износостойких покрытий и др., когда элементарные технологические воздействия на объект обработки совмещаются во времени и (или) пространстве.

С этой целью нами разработан, апробирован и запатентован новый процесс СКО и комбинированный инструмент (КИ) (пат. 122055, бюл. 32, [1]), в основу которых положены принципы механо-физико-химического воздействия на обрабатываемую поверхность заготовки. В результате, по сравнению с ранее известными КИ, например, по а.с. 1252146, бюл. 31, обработка предлагаемым КИ позволяет значительно повысить качество обрабатываемой поверхности, ее триботехнологические характеристики, стойкость режущего и деформирующего элементов, производительность обработки. Это достигается за счет одновременной подачи в зоны обработки резцом и деформирующим элементом (вибрирующим шариком) под давлением напорных струй технологических жидкостей (СОЖ и РАС – раствора антифрикционной смеси).

Описание конструкции и принципы работы данного КИ приведены в работах [1, 2]. Здесь рассматриваются результаты теоретико-экспериментального исследования, касающиеся процесса СКО резанием (Р), поверхностным пластическим деформированием (ПД) и воздействием напорных струй технологических жидкостей (НСТЖ) – СОЖ и РАС на зоны контактов резца и шарика с поверхностью заготовки (СПКО-Р-ПД-НСТЖ). При такой совмещенной обработке обеспечиваются более благоприятные условия для процессов резания металла и пластического деформирования за счет подачи под заданным давлением НСТЖ, в частности снижение усилий резания и ПД.

По результатам исследования разработана обобщенная физико-математическая модель процесса обработки, включающая ниже следующие математические зависимости, которые позволяют рассчитать параметры и режимы СПКО-Р-ПД-НСТЖ.

$$q_{\Sigma p} = q_{1p} + q_{2 \text{ СОЖ}}, \quad q_{\Sigma ш} = q_{1ш} + q_{2 \text{ РАС}} \quad (1)$$