

Рис. 3. Стратификация факторов размерного восстановления цилиндрических поверхностей алмазным индентором по исследуемым характеристикам

Аналогичный анализ можно провести и для других параметров.

Для восстановления поверхностей стальных деталей значения приведенных характеристик, естественно, будут ниже, но они могут быть легко получены с использованием вышеприведенной апробированной методики.

Способ достаточно прост, точен и надежен, не требует высококвалифицированных специалистов и применим для поверхностей, работающих в условиях трения скольжения. Рекомендуются для размерного восстановления дорогостоящих деталей.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ СЛОЕВ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

Гаврилюк А.А. (каф. механики, ТРТУ, г. Таганрог, Россия)

Наплавка - нанесение с помощью сварки плавлением слоя металла на поверхность изделия. При восстановлении, ремонте наплавку выполняют примерно тем же металлом, из которого изготовлено изделие, однако такое решение не всегда целесообразно. Иногда при изготовлении новых деталей (и даже при ремонте) целесообразней на поверхности получить металл, отличающийся от металла детали. Действительно, в ряде случаев условия эксплуатации поверхностных слоев значительно отличаются от условий эксплуатации всего остального материала изделия. Так, например, если деталь (изделие) должна определять общую прочность, которая зависит от свойств металла и его сечения, то поверхностные слои должны работать на абразивный или абразивно-ударный износ (направляющие станин, зубья ковшей землеройных орудий, желоба валков канатно-подъемных устройств и др.). Условия работы могут усложняться повышенной температурой, эрозионно-коррозионным воздействием окружающей среды (морской воды, различных реагентов в химических производствах и др.). Иногда такие детали и изделия целиком изготавливают из металла, который обеспечивает и требования к эксплуатационной надежности работы его поверхностей. Однако это не всегда наилучшее и, как правило, не экономичное решение. Часто оказывается целесообразней все изделие изготавливать из более дешевого и достаточно работоспособного металла для конкретных условий эксплуатации и только на поверхностях, работающих в особых условиях, иметь необходимый по толщине слой другого материала. Иногда это дости-

гается применением биметаллов (низкоуглеродистая сталь и коррозионно-стойкая сталь; сталь и титан и др.), а также поверхностным упрочнением (поверхностной закалкой, электроискровой обработкой и др.), нанесением тонких поверхностных слоев (металлизацией, напылением и пр.) или наплавкой слоев значительной толщины на поверхность [2].

При изготовлении новых изделий в целях обеспечения надлежащих свойств конкретных поверхностей обычно применяют относительно простые стали (например, низкоуглеродистые), а на рабочие поверхности наплавляют, например, бронзу, заменяя тем самым целиком бронзовую деталь, кислотостойкую сталь (для работы в условиях воздействия соответствующей химически агрессивной среды) или материал, хорошо работающий на истирание (при наличии трения с износом) и т.п. Такие слои можно наносить на наружные поверхности деталей (например, валы, валки прокатного оборудования, рельсовые крестовины и др.) или внутренние поверхности - обычно цилиндрических изделий (корпуса химических и энергетических реакторов, оборудование химических производств и др.).

Наплавку осуществляют нанесением расплавленного металла на поверхность изделия, до оплавления или до температуры надежного смачивания жидким наплавленным металлом. Наплавленный слой образует одно целое с основным металлом (металлическая связь). При этом, как правило (кроме некоторых случаев ремонтной наплавки, применяемой для восстановления исходных размеров деталей), химический состав наплавленного слоя может значительно отличаться от состава основного металла. Толщина наплавленного металла, образованного одним или несколькими слоями, может быть различной: 0,5 ... 10 мм и более [1].

Необходимые свойства металла наплавленного слоя зависят от его химического состава, который, в свою очередь, определяется составом основного и дополнительного металлов и долями их участия в образовании шва. Влияние разбавления слоев основным металлом тем меньше, чем меньше доля основного металла в формировании слоя ( $\gamma_0$ ). В связи с этим для случаев (а их большинство), когда желательно иметь в наплавленном слое состав, максимально приближающийся к составу наплавляемого металла, необходимо стремиться к минимальному проплавлению основного металла, т.е. к уменьшению  $\gamma_0$ . При многослойной наплавке состав каждого слоя различен, так как различна доля участия основного металла (на который наплавляют) в образовании наплавленного слоя. Если при наплавке 1-го слоя основной металл непосредственно участвует в формировании шва, то при наплавке 2-го и последующих слоев он участвует косвенно, определяя состав предыдущих слоев. При наплавке большого числа слоев при некоторых условиях наплавки состав металла поверхностного слоя может быть идентичен дополнительному наплавляемому металлу. Доля участия основного металла в формировании наплавленного металла зависит как от принятого способа, так и от режима наплавки.

Различные дуговые методы наплавки отличаются друг от друга тепловой подготовкой основного и наплавляемого металлов. Так, например, при плазменной наплавке с токоведущей присадочной проволокой тепло-вложение преимущественно осуществляют в присадочную проволоку, основной металл подогревается достигающими его поверхности остывающими потоками плазмы дуги и теплотой перегретого жидкого наплавляемого металла. Проплавление основного металла в этом случае может быть заметно уменьшено. Наоборот, при дуге прямого действия, когда на основном металле располагается катодное или анодное пятно дуги, ограничить расплавление основного металла значительно труднее, особенно при значительном сосредоточении дугового

разряда (уменьшении диаметра плавящегося электрода, увеличении плотности тока в электроде). Рассредоточение тепловложения в основной металл, например при ленточном электроде, когда дуга перемещается по торцу ленты от одного конца к другому и иногда возникает одновременно в нескольких местах, может заметно снизить долю расплавляемого основного металла.

При ручной дуговой наплавке покрытыми электродами, а особенно при механизированной наплавке плавящейся электродной проволокой в среде защитных газов или под флюсом, доля основного металла в наплавленном слое  $\gamma_0$ , как правило, не может быть, без опасности получения непровара, снижена менее чем до 0,2. Сопоставление долей участия основного металла в 1-м слое применительно к наплавке хромоникелевой аустенитной стали на низкоуглеродистую различными способами наплавки на обычных режимах приведено в виде диаграммы на рис. 1. Естественно, что  $\gamma_0$  зависит также от свойств основного и наплавляемого металлов, в частности от их температуры плавления. Например, дуговая наплавка покрытыми электродами, обеспечивающими наплавленный металл типа алюминиевой бронзы ( $T_{пл} = 1000^\circ\text{C}$ ), на низкоуглеродистую сталь дает меньшую долю  $\gamma_0$ , чем показано на рис. 1 для того же способа наплавки, но высоколегированной стали ( $T_{пл} = 1420^\circ\text{C}$ ). Определенную роль в этом снижении  $\gamma_0$  играет и увеличение коэффициента наплавки  $\alpha_n$  (г/А·ч), который при бронзовых электродах составляет  $\sim 18$  г/(А·ч), а при электродах из высоколегированной стали  $\sim 13$  г/(А·ч) [1,4].

Аналогично может влиять и применение при наплавке, выполняемой под флюсом или в защитных газах, электродной ленты, спрессованной из порошков, по сравнению с прокатной. Большее электрическое сопротивление спрессованной ленты и ее меньшая теплопроводность приводят к более быстрому ее расплавлению (большему ос., при том же, как при прокатанной ленте, режиме наплавки) и возможному уменьшению доли основного металла в наплавленном слое.

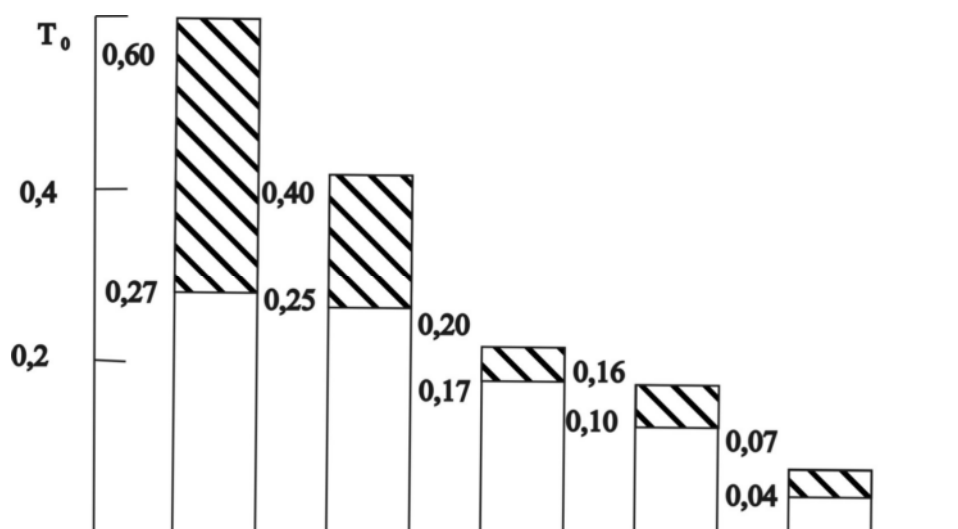


Рис. 1. Доля участия основного металла в первом слое наплавки (хромоникелевая аустенитная сталь), выполненной различными способами на обычных режимах: 1 - автоматическая под флюсом; 2 - ручная дуговая покрытыми электродами; 3 - автоматическая под флюсом с дополнительной присадочной проволокой; 4 - автоматическая под флюсом ленточным электродом; 5 - плазменной струей с токоведущей проволокой

Естественно, что на долю основного металла в наплавленном слое влияет и интенсивность теплоотвода в наплавляемом изделии, который зависит от теплофизических свойств металла этого изделия, его геометрических размеров (в частности, толщины металла вблизи наплавляемой поверхности), а также наличия искусственного регулирования термического режима наплавляемой детали (сопутствующего наплавке подогрева или интенсификации охлаждения различными приемами). На рис. 2 показано влияние на величину  $\gamma_0$  толщины наплавляемой детали (алюминиевой бронзы) при наплавке монель-металла покрытыми электродами разного диаметра. При увеличении толщины детали усиливается теплоотвод и уменьшается проплавление основного металла.

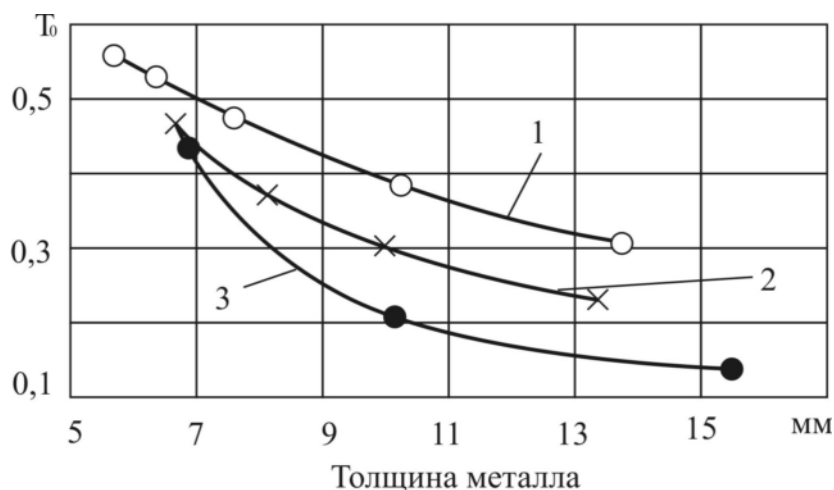


Рис. 2. Влияние толщины детали и режима наплавки на долю основного металла в одностороннем валике ( $\gamma_0$ ) при наплавке медно-никелевыми электродами на бронзу: 1 – Ø 4 мм,  $I_{св} = 140$  А; 2 – Ø 5 мм,  $I_{св} = 190$  А; 3 – Ø 6 мм,  $I_{св} = 210$  А

**Список литературы:** 1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1981. - 279с. 2. Справочник технолога - машиностроителя. / Под ред. А.Г.Косиловой, Р.К.Мещерякова. В 2 т.- 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1986, т.2. - 496с. 3. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. - 84с. 4. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. - 288с.

## ПОВЫШЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЗА СЧЕТ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИХ ОБРАБОТКИ

Голембиевская Т.Н., Кузнецова А.В., Ивченко Т.Г.

(каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Важнейшие эксплуатационные свойства деталей машин – износостойкость, прочность, герметичность в значительной мере зависят от состояния их поверхностного слоя, формируемого в процессе механической обработки. Совершенствование техники и интенсификация рабочих процессов в машинах приводит к усложнению условий ра-

боты - возрастанию статических и динамических нагрузок, действию тепловых и гидравлических ударов, вибраций. В связи с этим возрастают и требования к герметичности соединений, используемых в конструкциях машин, что определяет актуальность задач по исследованию герметичности, как на стадии проектирования, так и изготовления маши, а также поиску путей ее повышения.

В настоящее время имеется достаточно большое количество информации по технологическому обеспечению параметров состояния поверхностного слоя и их взаимосвязи с эксплуатационными свойствами деталей машин [1, 2]. Однако, несмотря на это, рекомендации по количественным оценкам достигаемых при этом параметров герметичности практически отсутствуют. Имеющиеся по этим вопросам разработки [3, 4] требуют дальнейшего развития как с точки зрения совершенствования методики оценки, так и расширения анализируемых методов обработки.

Целью настоящей работы является исследование технологических возможностей методов лезвийной, алмазно-абразивной и отделочно-упрочняющей обработок в повышении герметичности соединений деталей.

Герметичность соединений определяет их способность удерживать утечку газа или жидкости [1]. Из закона Дарси для фильтрационного потока утечка, характеризующая герметичность, определяется следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = \pi D \Delta p H k'' / \mu' l, \quad (1)$$

где  $\mu'$  - динамический коэффициент вязкости уплотняемой среды;  $l$  и  $D$  - размеры соединения;  $\Delta p$  - перепад давления;  $H$  - толщина пористого слоя под нагрузкой;  $k''$  - коэффициент проницаемости.

С учетом известных взаимосвязей толщины пористого слоя под нагрузкой и коэффициента проницаемости с шероховатостью, волнистостью и макроотклонениями сопрягаемых поверхностей утечка может быть определена по формуле [1]:

$$Q_{\Sigma} = 0,0066 \frac{D \Delta p U \{ 0,5 [ (H_{max1} + H_{max2}) + (W_{z1} + W_{z2}) + 6(R_{a1} + R_{a2}) ] - y_{ck} \}}{\mu' l}, \quad (2)$$

где  $H_{max}$  - максимальное макроотклонение;  $y_{ck}$  - контактное сближение деталей при скольжении;  $R_a$  - параметр шероховатости;  $W_z$  - параметр волнистости;  $U$  - константа Кармана (0,20-0,22).

Представленная зависимость свидетельствует о том, что герметичность соединений деталей определяется геометрией уплотнения, факторами внешнего воздействия, а также состоянием контактирующих поверхностей. Следовательно, одним из резервов повышения герметичности является рациональный выбор методов их обработки.

Наибольший интерес для обеспечения герметичности неподвижных герметичных соединений вызывают С-образные металлические упругие уплотнения, представляющие внутреннюю часть разрезанного тонкостенного полого шара, помещенного в канавке открытого или полуоткрытого типа. Существующая методика расчетов утечек или усилий герметизации для таких соединений [1, 2], учитывающая геометрию сопрягаемых поверхностей во всех ее аспектах и их контактные перемещения, позволяет произвести сравнение различных технологических методов обработки деталей по обеспечению герметичности.

В соответствии с известной теорией [1] контактных перемещений их величину для одного из вариантов С-образных уплотнений, представленного на рис.1, можно

рассчитать по формуле:

$$y = \left[ \frac{(Ra_1 W_{z1})^{0,4}}{H_{\mu 1}^{0,2}} \left( 1 + 2\pi \frac{1 - \mu_1^2}{E_1 Ra_1} H_{\mu 1} S_{m1} \right) + \frac{(Ra_2 W_{z2})^{0,4}}{H_{\mu 2}^{0,2}} \left( 1 + 2\pi \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 Ra_2} H_{\mu 2} S_{m2} \right) \right] \times 1,1 (P/D (ctg \alpha + ctg \gamma))^{0,2}, \quad (3)$$

где  $D$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  – геометрические параметры уплотнения;  $H_{\mu}$  – степень упрочнения;  $S_m$  – средний шаг неровностей;  $H_{\mu}$  – степень упрочнения;  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов контактирующих поверхностей.

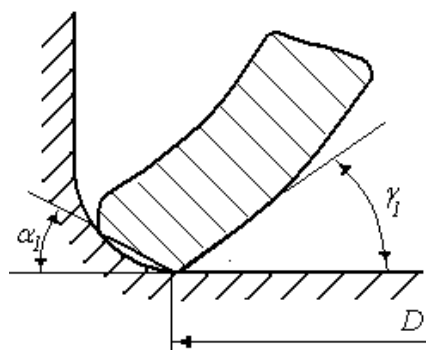


Рис.1. Схема С - образного уплотнения

Из уравнения (3) получена формула для определения усилия герметизации, обеспечивающего заданную утечку  $Q_{\Sigma}$  [1], из которой следует, что усилия герметизации так же, как и утечка, наряду с геометрией уплотнения и физико-механическими свойствами его материала зависят от параметров состояния поверхностного слоя контактирующих поверхностей. Следовательно, рациональный выбор методов их окончательной обработки для одних и тех же конструктивных и геометрических параметров уплотнений обеспечивает возможность управления требуемыми усилиями герметизации и повышения герметичности.

$$P = \left\{ \frac{\left[ D (tg \alpha_1 + tg \gamma_1) \right]^{0,2} \left[ 8,87 \sqrt{\frac{Q_{\Sigma} \mu' l}{D \pi \Delta p U}} + (H_1 + H_2) + (W_{z1} + W_{z2}) + 6(Ra_1 + Ra_2) \right]}{\left[ \frac{(Ra_1 W_{z1})^{0,4}}{H_{\mu 1}^{0,2}} \left( 1 + 2\pi \frac{1 - \mu_1^2}{E_1 Ra_1} H_{\mu 1} S_{m1} \right) + \frac{(Ra_2 W_{z2})^{0,4}}{H_{\mu 2}^{0,2}} \left( 1 + 2\pi \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 Ra_2} H_{\mu 2} S_{m2} \right) \right]} \right\}^5. \quad (4)$$

Для количественной оценки повышения герметичности соединений при различных методах обработки поверхностей деталей машин в настоящей работе предлагаются следующие коэффициенты: коэффициент снижения утечки  $K_{утечки}$  и коэффициент снижения усилий герметизации  $K_{усилий}$ , необходимых для обеспечения заданной утечки  $Q_{\Sigma}$ :

$$K_{утечки} = Q_{\Sigma} / Q_{\Sigma баз}, \quad K_{усилий} = P / P_{баз}, \quad (5)$$

где  $Q_{\Sigma}$  и  $Q_{\Sigma баз}$ ,  $P$  и  $P_{баз}$  – значения утечек и усилий герметизации для сравниваемого и базового вариантов обработки.

Возможности методов лезвийной, абразивной и отделочно-упрочняющей обработки внутренних поверхностей вращения в обеспечении параметров состояния поверхностного слоя, влияющих на герметичность соединений [2], представлены в табл. 1.

Таблица 1. Возможности методов обработки внутренних поверхностей вращения в обеспечении параметров состояния поверхностного слоя

Метод обработки	Параметры состояния поверхностного слоя внутренних поверхностей вращения				
	$R_a$ , мкм	$W_z$ , мкм	$H_{max}$ , мкм	$S_m$ , мкм	$H_{\mu}$ , %
Растачивание	0.8-2.0	2.5-6.25	20-80	0.08-0.16	120-160
Шлифование	0.32-1.6	1.25-6.25	10-40	0.025-0.1	110-150
Раскатывание	0.05-1.6	1.6-5.0	5-40	0.025-0.1	130-210
Растачивание тонкое	0.2-0.8	0.5-4.0	6-40	0.20-0.1	130-170

Анализ указанных методов обработки поверхностей вращения свидетельствует о том, что наилучшими возможностями в обеспечении наименьших значений параметров шероховатости, волнистости, макроотклонения и наибольших значений микротвердости имеет отделочно-упрочняющая обработка раскатыванием.

Графики зависимости коэффициентов снижения утечки  $K_{утечки}$  и снижения усилий герметизации  $K_{усилий}$  от параметра шероховатости  $R_a$  при различных методах обработки - шлифовании, тонком растачивании и раскатывании в сравнении с чистовым растачиванием, принятым за базу, представлены на рис. 2.

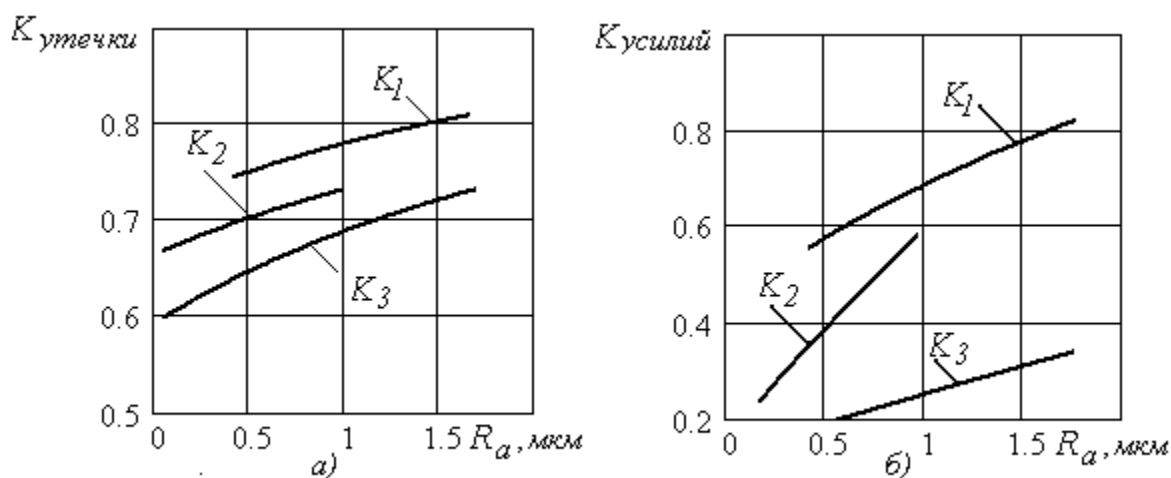


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов снижения утечки  $K_{утечки}$  - а) и снижения усилий герметизации  $K_{усилий}$  - б) от параметра шероховатости  $R_a$  ( $K_1$  – шлифование,  $K_2$  - тонкое растачивание,  $K_3$  – раскатывание)

Расчеты выполнялись для следующих условий:  $D = 100\text{мм}$ ,  $l = 25\text{мм}$ ,  $y_{ск} = 3\text{мкм}$ ;  $U = 0,21$ ;  $\mu' = 3$ ;  $\Delta p = 10\text{Мпа}$ ,  $Q_{\Sigma} = 0,01\text{м}^3 \cdot \text{мкм} \cdot \text{Па/с}$ ,  $\alpha_l = 10^\circ$ ,  $\gamma_l = 55^\circ$ .

Графики свидетельствуют о возможности повышения герметичности, то есть снижения утечки и усилий герметизации при использовании после чистового растачивания, как шлифования, так и тонкого растачивания и раскатывания, так как во всех случаях коэффициенты снижения утечки  $K_{утечки}$  и усилий герметизации  $K_{усилий}$  меньше 1. Однако, наилучшая

герметичность соединений (наименьшая утечка и наименьшее усилие герметизации) наблюдается после обработки внутренней поверхности вращения раскатыванием. При этом возможно снижение утечки и усилий герметизации, то есть повышение герметичности на 25-40% для одних и тех же конструктивных и геометрических параметров уплотнений и условий их эксплуатации за счет улучшения параметров состояния поверхностного слоя контактирующих деталей.

В результате анализа представленных графиков, установлено, что с увеличением шероховатости обработанных поверхностей для всех видов обработки герметичность соединений снижается, о чем свидетельствуют возрастающие утечка и усилие герметизации. Снижение шероховатости обработанных поверхностей может обеспечить снижение утечки и усилий герметизации, то есть повышение герметичности на 15-25% за счет выбора рациональных режимов лезвийной, алмазно-абразивной и отделочно-упрочняющей обработок.

Таким образом, предложена и апробирована методика количественной оценки повышения герметичности соединений с учетом всего комплекса параметров поверхностного слоя при различных методах лезвийной, алмазно-абразивной и отделочно-упрочняющей обработок цилиндрических поверхностей контактирующих деталей. На ее основании количественно обоснована возможность снижения утечки и усилий герметизации, то есть повышения герметичности соединений деталей машин за счет выбора наиболее рациональных методов их обработки. С использованием предложенной методики разработаны рекомендации по регламентации условий механообработки, обеспечивающих заданный уровень параметров состояния поверхностного слоя контактирующих деталей и соответствующий уровень герметичности соединений в узлах машин.

В результате проведенных исследований на основании разработанной методики количественно обоснован выбор методов отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием, гарантирующих повышение наряду с износостойкостью и прочностью еще одного из важнейших эксплуатационных свойств - герметичности соединений деталей машин.

**Список литературы:** 1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. - М.: Машиностроение, 2000. - 320с. 2. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995.-256с. 3. Дубоделова О. С., Нечепуренко А.В., Ивченко Т. Г. Влияние параметров состояния поверхностного слоя деталей машин на герметичность их соединений // Машинознавство / Матеріали 7-ої регіональної науково-методичної конференції. - Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С.29-32. . 4. Голембиевская Т.М., Стуруа А.А., Ивченко Т.Г. Технологическое обеспечение герметичности соединений деталей машин // Машинознавство / Матеріали 8-ої регіональної науково-методичної конференції. - Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С.38-41.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ

**Голубов Н.В., Скрынник И.В.**(каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Наплавка покрытий - это процесс нанесения покрытия из расплавленного материала на разогретую до температуры плавления поверхность восстанавливаемой детали.



Покрытия, полученные наплавкой, характеризуются отсутствием пор, высокими значениями модуля упругости и прочности на разрыв. Прочность соединения этих покрытий с основой соизмерима с прочностью материала детали.

Если в машиностроительном производстве наплавку применяют для повышения износостойкости трущихся поверхностей, то в ремонтном производстве - в основном для проведения последующих работ по восстановлению расположения, формы и размеров изношенных элементов. Восстановительная наплавка при этом обеспечивает также получение новых свойств поверхностей: коррозионной, эрозионной, кавитационной, износо-, жаростойкости и др.

Доля трудоемкости сварки и наплавки составляет ~ 70 % всех способов создания ремонтных заготовок при восстановлении деталей. Наплавка изношенных поверхностей занимает ведущее место вследствие своей универсальности.

Способы наплавки делят на группы в зависимости от видов применяемых источников тепла, характера легирования и способа защиты формируемого покрытия от влияния кислорода и азота воздуха.

Электродуговая наплавка имеет много видов. При их классификации учитывают следующие классификационные признаки:

- уровень механизации (ручная, полуавтоматическая, автоматическая);
- вид применяемого тока (постоянный, переменный, импульсный, специальной характеристики);
- вид электрода (плавящийся, неплавящийся);
- полярность электрода при постоянном токе (прямая, обратная);
- вид дуги (прямая, косвенная);
- режим (стационарный, нестационарный);
- способ защиты зоны наплавки от воздушной атмосферы (в среде защитных газов, водяных паров, жидкости, под слоем флюса, комбинированный);
- способ легирования наплавляемого металла (покрытием электрода, флюсом, электродным материалом, комбинированный).

Электродуговая наплавка получила наибольшее распространение в ремонте машин среди способов нанесения покрытий. Этот способ по сравнению с другими способами создания ремонтных заготовок дает возможность получать слои с высокой производительностью практически любой толщины, различного химического состава и с высокими физико-механическими свойствами. Наплавочные покрытия наносят на цилиндрические поверхности диаметром > 12 мм.

Технологические особенности электродуговой наплавки используют в целях ослабления нежелательных сопутствующих явлений, таких как окисление металла, поглощение азота, выгорание легирующих примесей и нагрев материала детали выше температуры фазовых превращений. Эти явления приводят к снижению прочности сварочного шва, нарушению термообработки материала, объемным, структурным и фазовым изменениям и короблению детали. Перемешивание материалов основы и покрытия ухудшает ее свойства.

При электродуговой наплавке применяют главным образом плавящиеся электроды. Неплавящиеся угольные электроды с введением присадочного материала в дугу используют при сварке тонколистовой стали и свинца и при наплавке твердыми сплавами почворезущих деталей. Сварка неплавящимся вольфрамовым электродом применяется при аргонодуговой наплавке.

Электродуговая сварка под слоем флюса по сути, является развитием ручной наплавки электродами с толстыми качественными покрытиями. Электрошлаковая на-

плавка характеризуется тем, что на нагретой поверхности детали образуется ванна расплавленного флюса, в которую введен электрод, а к детали и электроду приложено напряжение. Ток, проходящий от электрода через жидкий шлак к детали, выделяет тепло, достаточное для плавления шлака и электродного металла.

ЭШН применяют для получения биметаллических изделий и восстановления изношенных поверхностей крупных деталей с износом  $> 10$  мм. Таким образом восстанавливают опорные катки гусеничных машин, звенья гусениц, работающие в абразивной среде, инструмент, шестерни коробок передач и другие детали. ЭШН целесообразно применять при больших партиях деталей и значительных объемах наплавочных работ.

Сущность наплавки в среде защитных газов состоит в том, что в зону электрической дуги подают под давлением защитный газ, в результате чего столб дуги, а также сварочная ванна изолируются от кислорода и азота воздуха.

Для создания защитной атмосферы используют: инертные газы (аргон, гелий и их смеси), активные газы (диоксид углерода, азот, водород, водяной пар и их смеси) и смеси инертных и активных газов. Разновидностью процесса является газопламенная защита от сгорания горючих газов или жидкого углеводородного топлива. Наилучшую защиту металла при наплавке обеспечивают инертные газы, однако их применение ограничивается высокой стоимостью.

Применение флюса или защитных газов при дуговой наплавке связано с определенными технологическими трудностями. Использование порошковой проволоки или ленты с необходимым составом сердечника позволяет отказаться от флюса и защитных газов.

В состав сердечников электродных материалов кроме порошков легирующих компонентов вводят газо- и шлакообразующие вещества, которые защищают жидкий металл от воздействия атмосферы и повышают стабильность процесса наплавки.

Вибродуговая наплавка: электрод и деталь оплавляются во время дугового разряда, при этом на конце электрода образуется капля металла. Мелкокапельный перенос металла на деталь происходит преимущественно во время короткого замыкания. Так как длительность существования дуги составляет  $\sim 20$  % времени цикла, то провар основного металла неглубокий, с небольшой зоной термического влияния.

Импульсно-дуговая наплавка представляет собой разновидность электродуговой наплавки. В этом случае на основной сварочный ток непрерывно горящей дуги с помощью специального генератора налагают кратковременные импульсы тока, которые ускоряют перенос капель металла и уменьшают их размер. Плазменная наплавка - это процесс нанесения покрытий плазменной струей, когда деталь включена в цепь тока нагрузки. В этом случае с помощью плазменной струи нагреваются поверхность восстанавливаемой детали и наносимый материал. Материал перемещается плазменной струей. Температура ее может превышать 20 000 К.

При плазменной наплавке в отличие от аргонодуговой наплавки электрическая дуга сжимается стенками водоохлаждаемого сопла. Газ, продуваемый сквозь эту дугу, приобретает свойства плазмы - становится ионизированным и электропроводящим. Слой газа, соприкасающийся со стенками сопла, интенсивно охлаждается, утрачивает электропроводность и выполняет функции электрической и тепловой изоляции, что приводит к уменьшению диаметра плазменной струи, который составляет 0,7 диаметра сопла. В качестве плазмообразующего газа чаще применяется аргон. Наплавка с заменой аргона воздухом (до 90 %) значительно снижает стоимость восстановления деталей.

Сущность электромагнитной наплавки заключается в нанесении покрытия из порошка на поверхность заготовки в магнитном поле при пропускании постоянного тока большой силы через зоны контакта частиц порошка между собой и с заготовкой.

Магнитное поле создают в зазоре между заготовкой и полюсным наконечником. Оно выстраивает мостики частиц ферромагнитного порошка между указанными элементами. На магнитное поле, в свою очередь, налагают электрическое поле путем приложения напряжения к заготовке и полюсному наконечнику. Восстановительное покрытие получается за счет нагрева частиц порошка в зазоре, их оплавления и закрепления на восстанавливаемой поверхности.

Лазерная наплавка использует в качестве источника тепла концентрированный луч лазера.

С помощью лазеров выполняют: наплавку, оплавление напыленных поверхностей, поверхностное легирование, поверхностную закалку и аморфизацию материала. Лазерный вид нагрева позволяет также устранять повреждения в виде трещин в высоконагруженных деталях с нерегулярным режимом нагружения, соединять детали в труднодоступных местах и керамические изделия. После лазерной обработки деталей с трещинами по режиму, обеспечивающему их частичное оплавление, с последующей нормализацией детали работа разрушения детали на 30 % выше по сравнению с образцами, имеющими начальные трещины.

Сущность электронно-лучевой наплавки заключается в нагреве материала и поверхности детали потоком электронов. Способ обеспечивают высококонцентрированное вложения энергии в нагреваемую поверхность.

Газовая наплавка: этот вид наплавки получил распространение при нанесении покрытий из цветных металлов в виде проволоки и твердых сплавов в виде порошка. Несмотря на невысокую мощность газового пламени, оно дает мягкий и локальный нагрев, позволяет наносить покрытия на малогабаритные детали с небольшим износом в труднодоступных местах.

**Список литературы:** 1. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; Под ред. В.П. Иванова. - М.: Машиностроение, 2003. - 672с. 2. Восстановление изношенных деталей автоматической вибродуговой наплавкой. Челябинск, Кн. Изд., 1956. - 207с. 3. Восстановление изношенных деталей наплавкой трубчатыми электродами. М., ЦБТИ, 1960. - 33с.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

**Захарченко А.Д., Шевченко К.И.** (каф. механики, ТРТУ, г. Таганрог, Россия)

Зубчатые передачи имеют широкое применение в авиационной и космической технике. Их используют для передачи вращательного движения и мощности с изменением частот вращения и вращающих моментов в системах управления и в силовых установках ЛА, механизмах изменения стреловидности крыла самолета, главных и промежуточных редукторах и приводах рулевых винтов вертолетов, стыковочных устройствах ЛА и т.д. При проектировании зубчатых передач ЛА стремятся обеспечить при высоком уровне надежности малую относительную массу  $\gamma = m/T_{\text{тех}}$  передач и ажурность конструкций зубчатых колес ( $m$  – масса передачи, кг;  $T_{\text{тех}}$  – максимальный вращательный момент, Н·м).

Основными причинами выхода из строя авиационных зубчатых колес являются неправильные условия эксплуатации, выбор материала и ошибки в конструкции. Основными видами разрушения являются контактные разрушения (до 80% бракуемых зубчатых колес), износ активных поверхностей зубьев, задиры по боковым поверхностям на участках непосредственного контакта и разрушения (поломки) зубьев.

Контактные разрушения зубьев являются основной причиной отказов быстроходных зубчатых колес в хорошо смазываемых закрытых передачах. Основными причинами контактных разрушений зубьев являются: концентрация нагрузки по длине и профилю зубьев, особенно проявляющаяся при твердых зубьях ввиду их плохой прирабатываемости;

Основными причинами контактных разрушений зубьев является концентрация нагрузки по длине и профилю зубьев, наличие остаточных растягивающих напряжений на рабочих поверхностях зубьев, неблагоприятные эксплуатационные искажения профилей зубьев и воздействие на зубья смазки.

Концентрация нагрузки на зубья вызывается локализацией контакта зубьев из-за дефектов изготовления зубчатых передач и их сборки, неблагоприятных упругих деформаций деталей в связи с недостаточной жесткостью, неравномерного изнашивания зубьев соединений. Как правило, в большинстве случаев концентрация нагрузки проявляется у одного из краев зуба. Краевые контактные разрушения обычно возникают на зубьях конических зубчатых колес, что связано с несовершенством технологии их сборки.

На рис. 1 приведены характерные причины контактных разрушений, обусловленные концентрацией нагрузки: а – краевое локальное разрушение, б – срединное разрушение при перекосе зубьев в зацеплении, в – прерывистые разрушения на волнистой рабочей поверхности, г – краевое локальное разрушение изношенных зубьев.

Контактные разрушения, связанные с наличием остаточных растягивающих напряжений возникают преимущественно в зубьях колес с цементированными и закаленными, а затем шлифованными зубьями, в связи с образованием при шлифовании структурных концентраторов напряжений (рис. 2). Грубое шлифование боковых поверхностей цементованных и закаленных зубьев приводит иногда к образованию крупных отслаиваний поверхностных слоев материала (б). При упрочнении зубьев только по боковым сторонам в процессе эксплуатации иногда возникают сколы материала (в). Иногда при шлифовании в отпущенных зонах зуба контактные разрушения ориентируются в направлении шлифовочных штрихов (а).

В быстроходных передачах (при  $V \geq 100$  м/с) при струйной смазке зубьев на их рабочих поверхностях возникают вначале эрозионные повреждения от механического воздействия струй масла, а затем под действием возрастающих местных напряжений происходит выкрошивание материала на зубьях.

Неблагоприятные эксплуатационные искажения профилей зубьев происходят у неподвижных зубчатых колес высоконапряженных планетарных передач. По мере эксплуатации передач профиль рабочей поверхности зубьев искажается, контактные напряжения в зоне полного зацепления достигают предела контактной выносливости, а затем и превышают.

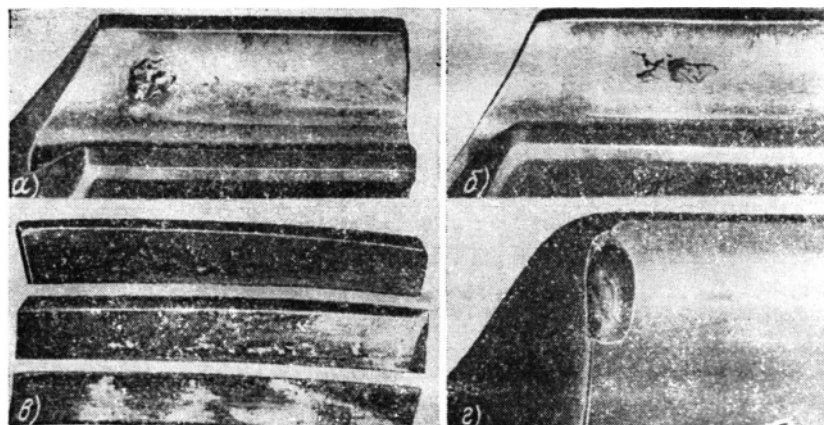


Рис. 1. Контактные разрушения, обусловленные концентрацией нагрузки

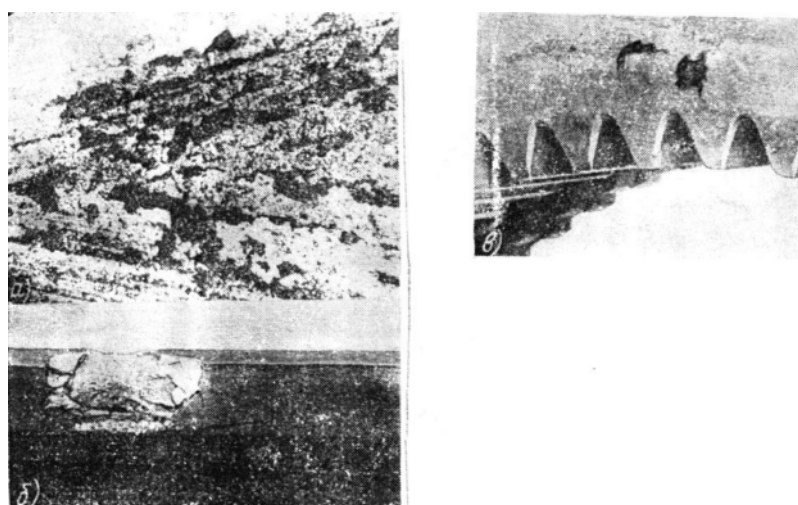


Рис. 2. Контактные разрушения, обусловленные остаточными растягивающими напряжениями

Износ зубьев является основной причиной отказов зубчатых колес открытых и закрытых передач, работающих в абразивной среде. Вследствие неодинаковой работы сил трения в разных точках профиля, износ неравномерен.

В разных точках профиля зубьев контактные давления и скорости относительного скольжения неодинаковы, поэтому износ зубьев по профилю неравнозначен. Чаще всего максимальный износ имеет место в зоне однопарного зацепления, где контактная нагрузка максимальна.

Неравномерный износ у конических зубчатых колес объясняется несовершенством технологии сборки этих передач и контроля по месту контакта зубьев.

Разрушения (изломы) зубьев делятся на усталостные и неусталостные. Последние, как правило, имеют в случаях статического или ударного воздействия нагрузки.

Усталостные разрушения зубьев, как правило, начинаются от переходной поверхности зубьев, с их рабочих боковых сторон. При наличии в зубьях локальных дефектов разрушения могут начинаться от этих дефектов даже в тех случаях, когда они расположены на некотором расстоянии от поверхности зубьев.

**Список литературы:** 1. Зубчатые передачи: Справочник / Под ред. Е.Г. Гинзбурга. – Л.: Машиностроение, 1980. – 416 с. 2. Основы расчета и конструирования деталей и механизмов летательных аппаратов.: Учеб. пособие. / Под ред. В.Н. Кестельмана, Г.И.Рощина.: Машиностроение, 1989. – 456 с. 3. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник / Под ред. Э.Б. Булгакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.

## ФОРМИРОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ (КАФО)

Карасёва Н.С. (каф. ТМ, БГТУ, г. Брянск, Россия)

Подшипники скольжения находят широкое применение в высокоточных узлах машин и механизмов, в том числе в технологической оснастке (передние и задние направляющие борштанг расточных станков и др.), работающей в динамическом режиме.

Для обработки поверхности вала как более твердого элемента, во многом определяющего триботехнические свойства соединения, предложена комбинированная антифрикционная обработка, которая состоит из трех подсистем: 1- предварительная чистовая обработка (чистовое точение либо шлифование); 2 – модификация поверхности путем нанесения мягкой прирабочной пленки одним из известных способов (химическим меднением либо фрикционным латунированием); 3 – финишная обработка ППД.

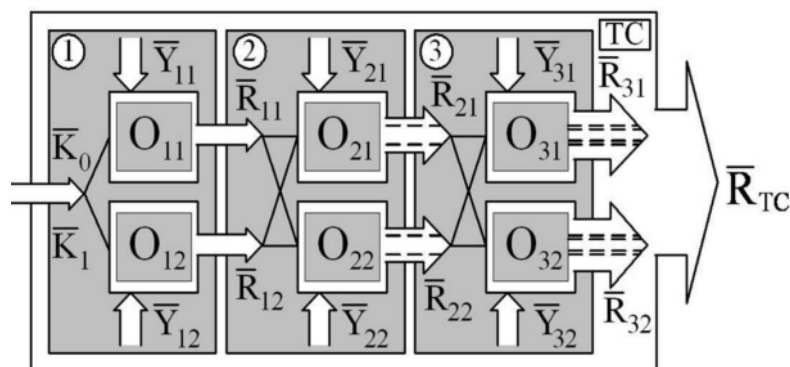


Рис. 1. Структура ТС комбинированной обработки на основе модификации поверхности мягкими прирабочными материалами и последующей обработки ППД: 1 – предварительная чистовая обработка; 2 – нанесение мягкого материала прирабочной плёнки; 3 – финишная отделочно-упрочняющая обработка

В качестве моделей валов брались образцы из стали 45 (HRC 48...50), рабочие поверхности которых были обработаны с использованием предлагаемой трехступенчатой комбинированной антифрикционной обработки (КАФО). Модели вкладышей изготавливались из бронзы ОЦС 5-5-5 и антифрикционного чугуна АСЧ 1.

Исследовалась триботехнологическая система, включающая следующие методы и режимы для подсистем: 1) чистовое точение композитом 10 – скорость  $V_T$  [м/мин], подача

$S$  [мм/об] и глубина  $t$  [мм] резания, жёсткость ТС  $j$  [кН/мм]; 2) модификация поверхности (МП) (фрикционное латунирование (3,0) и химическое меднение (1,5)); 3) алмазное выглаживание (АВ) – сила  $Q_{AB}$  [Н], подача  $S_{AB}$  [мм/об] и скорость  $V_{AB}$  [м/мин] при радиусе индентора  $r = 3,5$  мм; 4) приработка сопряжения (ПР) – скорость  $V_{пр}$  [м/мин] и погонная нагрузка  $P$  [Н/мм] приработки,  $\Delta P/P$  – относительная флуктуация нагрузки в динамике.

Матрица планирования представляет собой комплексный план исследования по схеме активного эксперимента триботехнологической системы, включающей трёхступенчатую антифрикционную обработку и факторы процесса приработки (табл. 1).

Таблица 1. Кодирование факторов и области факторного пространства триботехнологической системы

Код фактора	Факторы триботехнологической системы											
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>
	V <sub>T</sub>	S <sub>T</sub>	t	j	M <sub>тп</sub>	Q <sub>AB</sub>	S <sub>AB</sub>	V <sub>AB</sub>	M <sub>кэл</sub>	V <sub>пр</sub>	P <sub>пр</sub>	ΔP/P
–	65	0,05	0,1	2,5	1,5	100	0,075	65	2	10	30	0,15
+	200	0,15	0,25	16,2	3	300	0,15	100	5	50	50	0,25
Подсистемы	1				2	3			4			
A	ЧТК10 (2 <sup>4</sup> )								Подсистема приработки			
B	ЧТК10 + МП (2 <sup>5-1</sup> )											
C	ЧТК10 + МП + АВ (2 <sup>8-4</sup> )											
D	ЧТК10 + МП + АВ + ПР(2 <sup>12-8</sup> )											

По результатам обработки данных на ЭВМ строились физико-статистические модели Кобба-Дугласа формирования исследуемых параметров  $Y_i$  от факторов  $X_k$  триботехнологической системы, имеющие вид:

$$Y_i = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_k^{\beta_k} \quad (1)$$

где  $\beta_0, \beta_i$  – математические ожидания случайных коэффициентов модели.

В качестве параметров  $Y_i$  рассматривались параметры шероховатости, волнистости и отклонений от круглости, а так же триботехнические характеристики соединений.

Для каждой стадии обработки получены адекватные физико-статистические модели формирования параметров. Так, для окончательного значения параметра Ra (чистовое точение композитом 10 + модификация поверхности + алмазное выглаживание) имеем:

$$Ra = 14K \frac{S_t^{0,41} \cdot t^{0,25} S_{AB}^{0,1}}{V_T^{0,05} \cdot j^{0,21} \cdot Q_{AB}^{0,1} \cdot V_{AB}^{0,6}} \quad (2)$$

где  $K = 1,5^{1,05} = 1,53$  – для химического меднения;  $K = 3,0^{1,05} = 3,17$  – для фрикционного латунирования.

При исследовании отклонений от круглости в соответствии с ГОСТ 24642-81 рассматривались параметры **EFK** (F), **EFKa** (Fa), **EFKq** (Fq), **TFE** (a/b). Их формирование также исследовалось на всех последовательных стадиях КАФО. В результате обработки экспериментальных данных для первой стадии комбинированной обработки получены физико-статистические модели формирования параметров отклонений от круглости. Так, для параметра **EFK**:

$$EFK = 33,33K_1 \frac{V_T^{0,06} \cdot S_T^{0,044} \cdot t^{0,31}}{j^{0,27}} \quad (3)$$

По завершении стадии обработки (чистовое точение композитом 10 + модификация поверхности) установлено, что влияние соответствующих факторов на формирование рассматриваемых параметров убывает по следующей цепочке (в скобках указывается сумма мест, занимаемых каждым соответствующим фактором обработки по его

влиянию на каждый из четырёх параметров):

$$j(5) \rightarrow M_n(8) \rightarrow \begin{matrix} \nearrow t(15) \\ \searrow V_T(15) \end{matrix} \rightarrow S_T(17).$$

Известно, что обработка ППД устройством упругого действия не должна исправлять погрешности формы, в том числе отклонения от круглости. Однако в результате экспериментов выяснилось, что алмазное выглаживание на последней стадии комбинированной обработки способствует снижению величины ранее сформированных параметров **ЕФК** и др. Установлено, что это происходит за счёт взаимодействия кинематических факторов процесса АВ ( $V_{AB}$ ,  $S_{AB}$ ) и динамических параметров устройства ( $Q_0$ ,  $m$ ,  $c$ ), когда процесс АВ приближается к границе технологической устойчивости. Введены коэффициенты влияния факторов алмазного выглаживания на параметры отклонений от круглости, определяемые по общей зависимости  $K_{Pi} = P_{iAB} / P_{iпр}$ , где  $P_{iпр}$ ,  $P_{iAB}$  – величина  $i$ -того параметра, полученного в результате предварительной обработки и последующего АВ соответственно. Коэффициенты влияния имеют в рассматриваемой факторной области следующие интервалы варьирования:  $K_{ЕФК} = 0,56...0,95$ ;  $K_{ЕФКа} = 0,58...0,81$ ;  $K_{ЕФКq} = 0,64...0,91$ ;  $K_{TFE} = 0,65...1,1$ .

Микроанализ топографий функциональных поверхностей валов до и после обработки свидетельствует о том, что мягкая приработочная плёнка, существовавшая после алмазного выглаживания, сохраняется и по завершению процессов приработки. Причём, это происходит независимо от уровней исследуемых факторов, а также от параметров исходной и сформировавшейся эксплуатационной шероховатости на поверхностях вала и вкладыша.

Обработка результатов экспериментальных данных дала возможность построить адекватные физико-статистические имитационные модели:

$$Y_i = b_0 K_1 K_2 V_T^{b_1} S_T^{b_2} t^{b_3} j^{b_4} Q_{AB}^{b_6} S_{AB}^{b_7} V_{AB}^{b_8} V_{пр}^{b_{10}} P_{пр}^{b_{12}} \Delta_p^{b_{13}}, \quad (4)$$

где  $Y_i$  –  $i$ -ая триботехническая характеристика;  $K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты, учитывающие вид приработочной плёнки (фрикционное латунирование (ЛФ) или химическое меднение (МХ)) и материал вкладыша соответственно;  $b_k$  – коэффициенты модели Кобба-Дугласа (табл. 2)

Таблица 2. Параметры имитационных моделей

Ко-эфф.	$b_0$	$K_1$		$K_2$		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_{10}$	$b_{11}$	$b_{12}$	$F_{расч}$
		ЛФ	МХ	Бр	АСЧ											
$f_1$	2,0	1,31	1,10	1,11	$1,0_5$	-0,06	0,04	-0,05	0,02	-0,07	0,47	-0,05	-0,32	-0,09	–	1,3
$f_0$	2,82	1,64	1,20	0,92	$0,9_6$	0,03	0,20	0,19	0,11	-0,14	0,28	-0,03	-0,35	0,03	0,62	0,5
$h_{01}$	3,74	1,20	1,07	1,23	$1,0_9$	0,31	0,15	0,02	0,04	-0,38	0,32	0,68	0,05	-0,74	-0,19	5,6
$h_{02}$	8,08	1,10	1,04	1,28	$1,1_1$	0,07	0,27	0,09	-0,07	-0,16	-0,04	0,05	0,04	0,10	-0,40	4,7
$I_1 \times 10^{-12}$	$31_6$	1,77	1,23	0,87	$0,9_4$	0,08	0,22	0,21	0,13	-0,17	0,43	-0,05	-0,43	-0,10	0,76	2,8
$I_2 \times 10^{-11}$	$14_7$	1,80	1,24	0,94	$0,9_7$	0,08	0,22	0,14	0,14	-0,13	0,25	-0,06	-0,4	0,02	0,64	2,1