

11416

Министерство высшего  
и среднего специального образования РСФСР

---

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Ст. преподаватель И. В. ПОЗДНЯКОВА

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН, ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

05.02.02

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Ю. Г. ПРОСКУРЯКОВ

Челябинск, 1966 г.

ЧПИ

---

---

---

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании совета по присуждению ученых степеней при Челябинском политехническом институте или прислать отзыв в 2-х экземплярах.

Диссертация содержит 225 страниц машинописного текста, 34 таблицы, 134 фигуры и приложения.

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 1966 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Адрес института: г. Челябинск, 44, проспект имени В. И. Ленина, 76. Телефон 9-37-79.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 1966 г.

Ученый секретарь совета, доцент,  
кандидат технических наук  
В. Н. ГОНЧАР

Работа выполнена на кафедре "Станки и инструмент" Челябинского политехнического института.

Одной из основных проблем современного машиностроения является проблема повышения долговечности и эксплуатационной надежности выпускаемых изделий.

Рациональное использование материальных ресурсов с максимальной экономической эффективностью и меньшими трудовыми затратами требует создания долговечных и надежных конструкций машин, безотказно работающих в заданных условиях и с минимальным количеством текущих и капитальных ремонтов. В настоящее время многие машины в различных областях промышленности имеют весьма ограниченный срок службы, в связи с чем народное хозяйство несет огромные убытки.

Повышение быстроходности, мощности и производительности всех видов машин при одновременном выполнении требований по долговечности и надежности вызывает необходимость увеличения таких эксплуатационных показателей как прочность и износостойкость деталей машин.

Известно, что разрушение деталей машин в большинстве случаев практики начинается с поверхностного слоя. Это объясняется тем, что тонкий поверхностный слой металла наиболее уязвим и ослаблен. Отсюда вытекает исключительно большое значение качества поверхностного слоя для повышения прочности, износостойкости и других эксплуатационных характеристик деталей.

При оценке качества поверхностей деталей машин необходимо учитывать комплекс свойств по-

верхностного слоя металла. В него входят требования к микрогеометрии поверхности, упрочнению или разупрочнению металла, знаку и характеру распределения остаточных напряжений, структуре поверхностного слоя после его механической обработки и др.

Интенсивность и характер изменения физико-механических свойств поверхностных слоев металла зависят от методов обработки деталей.

Исследованиями и практикой последних лет установлено, что в настоящее время разработано довольно много новых высокопроизводительных процессов механической поверхностной упрочняющей обработки, которые наряду со значительным улучшением микрогеометрии поверхности создают в поверхностном слое упрочнение с определенной кристаллографической ориентацией зерен деформированного металла и обеспечивают получение благоприятного распределения остаточных напряжений, способствуя тем самым, как правило, повышению эксплуатационных свойств обработанной поверхности — износоустойчивости, прочности, качества подвижных и неподвижных посадок и др.

Однако полученные выводы, представляющие несомненно значительную ценность для производства, в большинстве своем, основываются на результатах экспериментальных исследований в зависимости от технологических параметров процесса и не раскрывают, в большинстве случаев, физической сущности явлений. Поэтому они часто бывают недостаточны для понимания природы процессов поверхностного упрочнения и в ряде случаев не дают достаточно точных научно обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных режимов процесса для различных конкретных условий эксплуатации. Совершенно недостаточно изучен вопрос износоустойчивости механически упрочненных поверхностей. В литературе имеются указания, что механическая поверхностная упрочняющая технология при правиль-

ном назначении режимов наклепа металла в состоянии обеспечить значительное улучшение износостойкости трущихся поверхностей. Большинство имеющихся в литературе рекомендаций по выбору оптимальных режимов обработки получены, в основном, для методов обработки наружных поверхностей. Что же касается методов упрочнения внутренних поверхностей, то здесь имеются только общие замечания о повышении износостойкости отверстий, обработанных, например, методом дорнования. При этом нигде не сказано о количественной величине износа предварительно упрочненных дорнованием поверхностей; о влиянии взаимного расположения направления образованной при дорновании кристаллографической ориентации зерен металла и направления перемещения трущихся поверхностей на степень износа при истирании; о влиянии величины, знака и характера распределения остаточных напряжений и др. Не приводится также рекомендаций по выбору рациональных режимов дорнования с целью обеспечения наибольшей износостойкости обработанных отверстий.

В настоящей работе поставлена задача восполнить этот пробел в изучении износостойкости обработанных дорнованием поверхностей в зависимости как от свойств упрочненного металла поверхностных слоев, так и от характера последующей эксплуатации.

На основании анализа и обобщения литературных данных определен основной круг вопросов, подлежащих экспериментально-теоретическому исследованию.

1. Определение влияния режимов дорнования отверстий на напряженное состояние и физико-механические свойства поверхностного слоя металла.

2. Исследование влияния физико-механических свойств поверхностных слоев металла, обработанных дорнованием стальных образцов, на интенсивность их износа в условиях трения - скольжения.

3. Исследование износостойкости обработанных дорнованием стальных образцов в условиях трения-скольжения при различных схемах нагружения (при вращательном и возвратно-поступательном перемещении трущихся пар) и сравнение их износостойкости с образцами, обработанными методами резания (протягиванием, растачиванием и др.).

4. Выявление, на основании результатов исследований, рациональных режимов процесса дорнования отверстий, обуславливающих повышение износостойкости трущихся поверхностей и определение наиболее целесообразных условий эксплуатации обработанных дорнованием отверстий.

5. Проверка результатов теоретических и лабораторно-экспериментальных исследований в производственных и эксплуатационных условиях.

#### Напряженное состояние обработанных дорнованием деталей и физико-механические свойства поверхностного слоя металла

Инструмент - дорн, продвигаясь по каналу обрабатываемого отверстия, передает на стенку детали определенное давление. Помимо этого, на контактной поверхности дорна с обрабатываемой деталью возникают силы трения. Силы нормального давления и силы трения являются источником деформаций металла детали в процессе дорнования.

Под действием сил нормального давления  $dN$  и сил трения  $dT = f \cdot dN$  металл детали претерпевает сложное деформированное состояние, вызывающее в стенке обрабатываемой детали сложное напряженное состояние, обеспечивающее определенные свойства деформированного металла.

В работе предложена методика определения напряженного состояния металла, по размерам областей его деформирования в зоне заборного конуса дорна (область упругих деформаций; область упруго-пластических деформаций; область пластических деформаций) при разных режимах процесса дорнования.

Размеры этих областей оказывают существенное влияние на состояние металла в очаге деформирования, величину и характер распределения остаточных напряжений в стенке детали и степень упрочнения поверхностных слоев металла. Изменяя условия процесса дорнования, можно изменять соотношение размеров этих областей, переводя, тем самым, металл из одного режима деформирования в другой, и получать детали с определенными заранее заданными качествами обработанных поверхностей.

Определение величины каждой из областей деформирования может быть произведено по уравнениям:

$$l_{уп} = \frac{\sigma_{\text{до}}}{E} \cdot \frac{z_1}{\sin \alpha} \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{(1 - \frac{z_2^2}{z_1^2})}{(1 - f \cdot \text{tg} \alpha)} \right];$$

$$l_{п/у} = \frac{\sigma_{\text{до}}}{E} \cdot \frac{z_1}{\sin \alpha} \left[ \frac{z_2^2}{z_1^2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{e}{E} (\frac{z_2^2}{z_1^2} - 1) + 2 \ln \frac{z_2}{z_1}}{(1 + \frac{e}{E}) (1 - f \cdot \text{tg} \alpha)} \right] \cdot l_{уп};$$

$$l_{пл} = l_{\text{полн}} - l_{п/у} - l_{уп};$$

$$l_{\text{полн}} = \frac{\delta z_1}{\sin \alpha};$$

здесь:  $l_{уп}$ ,  $l_{п/у}$  и  $l_{пл}$  соответственно размеры областей упругих, упруго-пластических и пластических деформаций дорнуемой детали - втулки, измеренные по образующей заборного конуса дорна;

$l_{\text{полн}}$  - полная длина образующей отверстия в зоне контакта заборного конуса инструмента с деталью;

$\sigma_{\text{до}}$  - начальный предел упругости обрабатываемого материала;

$E$  - модуль упругости материала детали;  
 $e = \frac{4}{3} \text{ Дм}$  (Дм - модуль упрочнения обрабатываемого материала);

- $r_1$  - радиус обрабатываемого отверстия;
- $r_2$  - радиус наружной поверхности детали;
- $\alpha$  - угол заборного конуса дорна;
- $f$  - коэффициент внешнего трения в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью;
- $\delta r_1$  - половина приращения диаметра отверстия в конце заборного конуса дорна.

Анализ полученных результатов по определению размеров всех трех областей зоны активного деформирования при дорновании показал, что протяженность каждой из рассмотренных областей зависит от условий дорнования (режимов процесса, размеров и свойств материала обрабатываемой детали). Из режимов процесса дорнования на соотношение размеров рассматриваемых областей влияют, в основном, угол заборного конуса дорна  $\alpha$  и относительный натяг  $\lambda$ . Последний оказывает решающее значение на величину области пластических деформаций.

Учитывая, что процесс дорнования отверстий преследует цель не только улучшения микрогеометрии обработанной поверхности, но и упрочнения поверхностного слоя металла, режим дорнования, сопровождающийся только упругим деформированием металла (наличие в зоне активного деформирования одной упругой области), без соответствующего упрочнения металла, на практике может применяться сравнительно редко.

Исследования показали, что исключительно большое влияние на упрочнение поверхностного слоя металла в процессе деформирования. величину остаточных напряжений и образование определенной кристаллографической направленности зерен металла. оказывают дополнительные сдвиги, возникающие в результате изгиба волокон металла по конфигурации дорна и внешнего трения между дорном и обрабатываемой деталью.



Первые дополнительные сдвиги металла появляются в области упруго-пластических деформаций. Увеличение давления в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью изделия (увеличение натяга дорнования) приводит к увеличению зоны дополнительных сдвигов и величины дополнительных сдвигов, наибольшие значения которых достигаются в области пластических деформаций. Математическая оценка большого количества экспериментально-теоретических исследований, проведенная с использованием электрической цифровой вычислительной машины "Урал-2", позволила установить зависимости для определения зоны дополнительных сдвигов в виде следующих уравнений:

$$F_1 = \frac{\pi(D_0^2 - d_0^2)}{4} - \frac{4 \cdot G_{e0} \cdot D_0^{5.0}}{10^{5.0} \cdot \lambda \cdot d_0^{4.2} \cdot \alpha^{0.04}} \quad \text{и}$$

$$r_s = 1.75 \rho^{0.75}$$

где:  $F_1$  - площадь зоны дополнительных сдвигов;  
 $D_0, d_0$  - соответственно наружный и внутренний диаметры обрабатываемой детали;  
 $\lambda$  - относительный натяг дорнования;  
 $\alpha$  - угол заборного конуса дорна;  
 $G_{e0}$  - начальный предел упругости обрабатываемого материала;  
 $r_s$  - радиус, ограничивающий зону дополнительных сдвигов;  
 $\rho$  - радиус пограничного слоя, разделяющего области пластических и упругих деформаций.

Полученные теоретические выводы были подтверждены результатами экспериментальных исследований, которые проводились применительно к обработке сталей 10, 20, 40, 45, 50Г, 30ХГСА, а также частично меди, латуни и дуралюмина.

Исследованиям подвергались образцы, обработанные дорнованием с различной степенью дефор-

мирования металла, что достигалось применением различных величин относительных натягов в пределах от 0,002 до 0,009. Дополнительно испытывались также образцы, обработанные методами резания (расточиванием, протягиванием и разворачиванием).

В работе проведены исследования макро- и микрогеометрии обработанных дорнованием отверстий и физико-механических свойств поверхностных слоев металла.

Исследования показали, что при дорновании отверстий происходит значительное улучшение микрогеометрии поверхности отверстия. Это осуществляется за счет смятия и выглаживания шероховатостей поверхности под действием нормальных сил и сил трения, образующихся на поверхности контакта детали и инструмента - дорна.

Так, при дорновании образцов из стали 45, высота шероховатостей поверхности, предварительно обработанной протягиванием, уменьшилась с  $R_z = 11,3$  мк до  $R_z = 3,76$  мк (при  $\lambda = 0,002$ ),  $R_z = 2,9$  мк (при  $\lambda = 0,003$ ) и  $R_z = 2,2$  мк (при  $\lambda = 0,005$ ). Большое влияние на высоту шероховатостей обработанной поверхности оказывают режимы дорнования и, в частности, относительный натяг, как один из важнейших факторов, определяющих степень происходящей при этом пластической деформации. Теоретически при увеличении натяга дорнования шероховатость обработанной поверхности должна уменьшаться пропорционально возрастающему давлению в месте контакта дорна и детали. В действительности же непрерывного уменьшения шероховатостей при возрастании натяга не наблюдается. По мере увеличения натяга дорнования интенсивность уменьшения высоты шероховатостей поверхности заметно снижается, так как при большой степени деформации упрочнение микрогребешка может быть настолько значительным, что при дальнейшем увеличении давления гребешок, почти не деформи-

руясь дальше, осуществляет пластическое деформирование слоев металла, расположенных под его основанием. Исследования показали, что снижение интенсивности уменьшения высоты шероховатостей с ростом относительного натяга особенно заметно проявляется при дорновании в режиме пластических деформаций.

Так, при обработке образцов из стали 45, увеличение относительного натяга свыше  $\lambda = 0,005$  (соответствует дорнованию в периоде пластических деформаций) почти не вызывает дальнейшего снижения высоты шероховатостей. Минимальная высота шероховатостей при этом соответствовала  $R_z = 1,8$  мк.

Результаты проверенных экспериментальных исследований показали, что в процессе дорнования происходит значительное упрочнение поверхностных слоев металла, расположенных у отверстия. Определение степени упрочнения и глубины распространения наклепанного слоя осуществлялось путем измерения микротвердости упрочненных слоев металла на поверхности косых срезов. Данные исследований показали, что степень упрочнения и глубина упрочненного слоя зависят от свойств обрабатываемого материала, размеров обрабатываемой детали и режимов процесса дорнования, из которых наибольшее влияние оказывает относительный натяг. Увеличение последнего приводит к увеличению как степени наклепа, так и глубины наклепанного слоя.

Так, например, при дорновании образцов из стали 20, наибольшая степень упрочнения, равная 124%, была получена при максимальном относительном натяге  $\lambda = 0,009$ , а при  $\lambda = 0,002$  степень упрочнения этих образцов достигла лишь 38%. Глубина наклепанного слоя при увеличении относительного натяга с  $\lambda = 0,002$  до  $\lambda = 0,009$  возросла с 0,01 мм до 0,08 мм. Однако при увеличении от-

носительного натяга дорнования свыше определенного предела (соответствующего периоду полной перегрузки) интенсивность повышения степени наклепа уменьшается, так как при большой степени деформации наступает "насыщение" поверхностных слоев металла в части упрочнения. При этом упрочнение достигает такой величины, что при дальнейшем увеличении контактного давления дорнования поверхностные слои, почти не деформируясь больше сами, осуществляют пластическое деформирование глубже лежащих слоев металла. Так, у образцов из стали 20 степень упрочнения и глубина упрочненного слоя, полученные при дорновании с  $\lambda = 0,007$  и  $\lambda = 0,009$ , не имеют существенного отличия.

Измерение степени наклепа и глубины наклепанного слоя у деталей - втулок, изготовленных из других материалов, применяемых при проведении исследований, показали аналогичные закономерности. При этом величина степени наклепа и глубина наклепанного слоя были различными в зависимости от размеров и свойств материала обрабатываемого изделия.

Определение степени наклепа  $N$  обработанных дорнованием стальных деталей рекомендуется определять по формуле:

$$N = 123 \lambda^{0,8} \cdot \sigma_s^{0,84} \cdot h^{0,44}$$

полученной в результате математической обработки экспериментальных исследований.

Здесь:  $\lambda$  - относительный натяг дорнования;

$\sigma_s$  - предел текучести обрабатываемого материала;

$h$  - толщина стенки детали.

Проведенные металлографические исследования на шлифах, приготовленных по косому срезу, подтвердили наличие вполне определенной кристаллографической ориентации зерен деформированного металла, создаваемой в процессе дорнования, в

направлении движения инструмента - дорна. Наиболее отчетливо текстура металла выражена вблизи поверхности отверстия. По мере удаления слоев металла от отверстия деформация, а следовательно и направленность зерен, становится все меньше и, наконец, на определенном расстоянии (соответствующем радиусу  $r_s$ ) исчезает. Исследования показали, что режимы дорнования и, в первую очередь, относительный натяг, оказывают существенное влияние на степень вытянутости и направленности деформированных зерен металла, а также на величину зоны распространения ориентированной текстуры, или зоны дополнительных сдвигов ( $F_f$ ).

В процессе дорнования отверстий, вследствие линейных и объемных изменений металла, сопровождающих пластическую деформацию, а также дополнительных сдвигов металла поверхностных слоев в стенке обработанной детали возникают остаточные напряжения.

Остаточные напряжения определялись путем измерения деформации образцов по мере удаления напряженных внутренних слоев металла. Измерение деформации образцов осуществлялось с помощью проволочных датчиков сопротивления, наклеенных непосредственно на поверхность исследуемых образцов. Запись электрических сигналов от датчиков производилась с помощью электронного потенциометра модели ЭП-120. Снятие тонких напряженных поверхностных слоев металла производилось электрополированием.

Ввиду большой трудоемкости и технической сложности экспериментального определения остаточных напряжений они определялись только у образцов - втулок, изготовленных из сталей и обработанных дорнованием с различными режимами ( $\lambda = 0,002 \div 0,009$ ).

Результаты исследований показали, что характер распределения остаточных напряжений по стен-

ке детали после обработки отверстий дорнованием имеет четкую закономерность. При дорновании в режимах полной перегрузки и полупругом у поверхности обрабатываемого отверстия появляются сжимающие окружные и осевые напряжения, которые постепенно по мере приближения к наружной поверхности детали переходят в растягивающие. Наибольшими по абсолютной величине являются окружные остаточные напряжения.

Максимальные по величине окружные и осевые остаточные напряжения возникают в слоях металла на глубине 0,15–0,20 мм от поверхности отверстия, что вызвано глубинным залеганием области наибольших касательных напряжений.

Иной характер распределения имеют радиальные остаточные напряжения, плавно уменьшающиеся от максимального значения (приблизительно в середине стенки) до нуля на внутренней и наружной поверхностях детали. В результате обработки дорнованием в деталях возникают радиальные напряжения только одного знака – сжимающие. Изменение натяга дорнования практически не оказывает влияния на характер распределения радиальных остаточных напряжений.

При дорновании в режиме упруго-пластических деформаций на величину остаточных напряжений существенное влияние оказывают режимы дорнования, и в первую очередь, относительный натяг, увеличение или уменьшение которого вызывает соответственно возрастание или уменьшение величин остаточных напряжений. Так, при дорновании деталей из стали 45 с  $\lambda = 0,002$  (радиус отверстия  $r_1 = 15$  мм и наружный радиус детали  $r_2 = 20$  мм) максимальная величина окружных остаточных напряжений  $\sigma'_{t \max}$  составила 8,19 кг/мм<sup>2</sup>. При применении относительного натяга  $\lambda = 0,003$  – значения  $\sigma'_{t \max}$  возросли до 11,61 кг/мм<sup>2</sup>. Величина осевых остаточных напряжений  $\sigma'_o$  также изменялась в зави-

симости от относительного натяга. При  $\lambda = 0,002$  они были равны  $\sigma'_{0\max} = 3,51 \text{ кг/мм}^2$ , а при  $\lambda = 0,003 - \sigma'_{0\max} = 5,6 \text{ кг/мм}^2$ . При дорновании в режиме пластических деформаций величина возникающих остаточных напряжений не зависит от принятого натяга. В рассмотренном выше случае увеличение относительного натяга с  $\lambda = 0,003$  до  $\lambda = 0,009$  не вызвало изменения величин остаточных напряжений.

Существенное влияние на величину возникающих в процессе дорнования остаточных напряжений оказывают свойства обрабатываемого материала. При увеличении начального предела упругости материала детали величины остаточных напряжений возрастают.

На основании результатов проведенных исследований получена зависимость для расчета величин осевых остаточных напряжений  $\sigma'_0$  в виде:

$$\sigma'_0 = 17,2 (\sigma'_t + 100)^{0,38} - 100.$$

Входящая в это выражение величина окружных остаточных напряжений  $\sigma'_t$  определяется по имеющейся довольно точной и удобной для практического применения формуле.

Влияние физико-механических свойств  
поверхностных слоев металла обработанных  
дорнованием стальных образцов на интенсивность  
их износа в условиях трения-скольжения

Проведенные в работе исследования показали, что сопровождающая процесс дорнования пластическая деформация металла оказывает весьма благоприятное влияние на повышение износостойкости обработанных поверхностей при истирании в условиях трения-скольжения. При этом было установлено, что износостойкость обработанных дорнованием поверхностей зависит от ряда факторов, основными из которых являются: свойства материала

изделия, режимы дорнования, удельная нагрузка на истираемую поверхность, скорость относительного скольжения трущихся поверхностей, условия смазывания мест контакта и направление перемещения поверхностей в процессе трения относительно направления главных осей деформации, сопровождающей процесс дорнования.

Методика проведения экспериментальных исследований на износ была построена с учетом выявления влияния всех этих факторов.

Исследованиям подвергались образцы-сегменты, вырезанные из цилиндрических образцов - втулок с радиусом отверстия - 15 мм, радиусом наружной поверхности - 27,5 мм и обработанных дорнованием с различными режимами ( $\lambda = 0,002 + 0,009$ ).

Истирание образцов производилось в условиях трения - скольжения при возвратно-поступательном и вращательном перемещениях истирающих эталонов и осуществлялось на специально спроектированных и изготовленных для этого многоместных установках.

Условия истирания на обеих установках были приняты одинаковыми. Испытания проводились при различных удельных нагрузках на образец, равных 5, 10 и 20 кг/см<sup>2</sup> и скоростях относительного скольжения 14 и 33 м/мин. Истирание образцов производилось при наличии ограниченной подачи смазки в зону трения каждого образца в количестве 10 капель в минуту. Длительность испытаний была принята равной 2200000 циклов (двойных ходов или оборотов истирающего эталона). Весь период испытаний был разбит на 8 этапов, после каждого из которых производилось определение износа образцов преимущественно по потере веса, путем взвешивания на аналитических весах с точностью до 0,1 мг.

Истирающий эталон представлял вал с одетыми на него по скользящей посадке эталонными втул-



ками из стали X12Ф, термообработанными до твердости НРС = 60-62. По наружному диаметру все эталонные втулки шлифовались до постоянной высоты шероховатостей, соответствующей 9 классу по ГОСТ 2789-59.

Исследование влияния микрогеометрии и физико-механических свойств поверхностных слоев обработанных дорнованием отверстий на их износостойкость в условиях трения - скольжения показали следующие результаты.

Уменьшение высоты шероховатостей, увеличение радиуса закругления их вершин, уменьшение волнистости поверхности, достигаемые в процессе дорнования отверстий, приводит к увеличению плотности контакта трущихся поверхностей, в результате чего уменьшается нагрузка на единичное пятно контакта. При этом износ становится меньшим, а износостойкость поверхности повышается. Так при истирании, в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала, образцов из стали 45 ( $P = 10 \text{ кг/см}^2$  и  $V = 33 \text{ м/мин}$ ) уменьшение высоты шероховатостей с  $R_z = 3,76 \text{ мк}$  (при  $\lambda = 0,002$ ) до  $R_z = 2,2 \text{ мк}$  (при  $\lambda = 0,005$ ) привело к уменьшению весового износа образцов на 32%. Увеличение высоты шероховатостей до 11,3 мк с соответствующим изменением их микрогеометрии (образцы, обработанные протягиванием режущей протяжкой) вызвало повышение весового износа по сравнению с продорнованными образцами ( $\lambda = 0,005$ ) в 3,5 раза. Однако исследования показали, что улучшение микрогеометрии поверхности является лишь одним из факторов, повышающих износостойкость деталей.

В работе показано, что микротвердость поверхностного слоя металла, обработанного дорнованием отверстия, оказывает также существенное влияние на износостойкость трущихся поверхностей. С увеличением микротвердости поверхности величина из-

носа уменьшается. Так, например, при истирании образцов из стали 45 в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала ( $P = 10 \text{ кг/см}^2$  и  $V = 33 \text{ м/мин}$ ) увеличение микротвердости поверхностного слоя с  $HV = 278 \text{ кг/мм}^2$  (при  $\lambda = 0,002$ ) до  $HV = 428 \text{ кг/мм}^2$  (при  $\lambda = 0,007$ ) привело к уменьшению весового износа образцов на 62%. Уменьшение микротвердости поверхности до  $HV = 235 \text{ кг/мм}^2$  (образцы, обработанные протягиванием режущей протяжкой) вызвало увеличение весового износа образцов по сравнению с продорнованными ( $\lambda = 0,007$ ) в 6,5 раза. Аналогичная закономерность износа наблюдается и у образцов, испытанных при истирании с вращательным движением эталонного вала. Между тем на основании опытов было установлено, что микротвердость не является главным фактором, определяющим износостойкость поверхностного слоя, т. к. она может быть только косвенным показателем, позволяющим определять степень упрочнения металла в результате его дорнования.

Более существенное влияние на износостойчивость обработанных дорнованием образцов оказывают появляющиеся после дорнования в поверхностном слое благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Результаты проведенных исследований подтвердили наличие определенной связи между износостойкостью обработанных дорнованием отверстий и величинами образовавшихся по стенке детали остаточных напряжений. Чем больше величины окружных и осевых сжимающих напряжений, тем меньше износ продорнованных поверхностей. Так, при истирании в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала ( $P = 10 \text{ кг/см}^2$ ,  $V = 33 \text{ м/мин}$  и  $L = 4000 \times 10^3 \text{ см}$ ) износ образцов из стали 45, обработанных дорнованием с  $\lambda = 0,002$ , был, примерно, на 62% больше по сравнению с образцами, продорнованными с  $\lambda = 0,009$ . При этом в пер-

вом случае величина окружных остаточных напряжений была на 35% меньше чем во втором, т. е. наибольший износ имели образцы, обработанные с наименьшим относительным натягом и имеющие в поверхностных слоях меньшие по величине сжимающие остаточные напряжения.

Износ образцов, обработанных дорнованием в режиме полной перегрузки, когда натяг дорнования не оказывает влияния на величину возникающих остаточных напряжений, не зависит от натяга дорнования. Так, при истирании образцов из стали 45 увеличение относительного натяга с  $\lambda = 0,007$  до  $\lambda = 0,009$  практически не вызывает повышения износостойкости. Разница в весовом износе этих образцов после пути трения  $L = 16500 \times 10^3$  см составила всего лишь 0,1 мг.

Результаты проведенных исследований дают основание считать, что износостойкость обработанных дорнованием поверхностей значительно зависит от величин сжимающих остаточных напряжений, возникающих в стенке детали при дорновании отверстий. Влияние последних на износостойкость поверхности связано с механизмом отрыва частиц металла в процессе износа. Наличие предварительных напряжений сжатия затрудняет этот отрыв и дает количественный эффект уменьшения износа.

На величину износа обработанных дорнованием образцов значительное влияние оказывают и условия истирания. Увеличение удельной нагрузки вызывает повышение износа образцов. Результаты проведенных испытаний показали, что весовой износ обработанных дорнованием образцов при увеличении нагрузки возрастает. Так, например, при истирании образцов из стали 20 в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала ( $\lambda = 0,005$ ,  $V = 33$  м/мин и  $L = 16500 \times 10^3$  см) наименьший весовой износ  $q = 4,2$  мг имели образцы, испытываемые при  $P = 5$  кг/см<sup>2</sup>, и наибольший-

$q = 24,3$  мг при  $P=20$  кг/см<sup>2</sup>. Как показало исследование микропланов поверхностей трения при удельных нагрузках на образец  $P=5$  кг/см<sup>2</sup> износ поверхностей происходит, в основном, по микрогребешкам. При  $P=10$  кг/см<sup>2</sup> износ микрогребешков значительно больше. Под действием большего давления ( $P=20$  кг/см<sup>2</sup>) происходит полный износ микрогребешков с последующим истиранием нижележащего слоя металла. При истирании образцов в условиях вращательного движения эталонного вала наблюдается аналогичная картина износа.

Скорость относительного скольжения поверхностей имеет обратное влияние - с увеличением скорости износ образцов уменьшается, что связано с условиями смазывания мест контакта и уменьшением коэффициента внешнего трения.

Результаты исследований показывают, что увеличением скорости относительного скольжения с 14 м/мин до 33 м/мин при истирании, например, образцов из стали 45 в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала ( $P=10$  кг/см<sup>2</sup> и  $\lambda = 0,005$ ) привело к уменьшению весового износа образцов почти в два раза. Аналогичная закономерность имеет место и при истирании с вращательным движением эталонного вала. Из результатов исследований следует, что с точки зрения повышения износостойкости обработанных дорнованием поверхностей при трении-скольжения, в пределах исследованных режимов, более целесообразно применять обработанные детали при больших скоростях относительного перемещения трущихся поверхностей.

Износостойкость образцов в условиях трения-скольжения при различных схемах нагружения

Исследования показали, что износ обработанных дорнованием образцов при истирании в условиях вращательного движения сопряженного вала

значительно меньше износа подобных образцов, испытанных в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала. Так, при истирании в условиях возвратно-поступательного перемещения эталонного вала ( $P=10 \text{ кг/см}^2$ ,  $v=33 \text{ м/мин}$ ) весовой износ образцов, обработанных дорнованием с различными режимами (сталь 45) во всех случаях был, примерно, в 2-4 раза больше износа аналогичных образцов, испытанных при вращательном движении истирающего эталона. Подобный характер износа наблюдался и у образцов, изготовленных из других материалов. Большая износостойкость поверхности образцов при трении с вращательным движением истирающего вала связана, в основном, с направлением образующейся в процессе дорнования текстуры деформированного металла.

Из результатов проведенных исследований видно, что при вращательном и возвратно-поступательном перемещениях истирающего вала образцы, приготовленные из одного кольца, вырезанного из образца - втулки, а следовательно не имеющие отличия в микротвердости, величине остаточных напряжений, микрогеометрии поверхности и структуре, получили существенную разницу в износе. Это объясняется большим сопротивлением металла поверхностных слоев образцов пластическому деформированию в процессе истирания с перпендикулярным направлением движения трения относительно созданной в процессе дорнования текстуры, по сравнению с истиранием, при котором движение трения осуществляется в направлении кристаллографической направленности зерен предварительно деформированного металла.

На уменьшение износа образцов при истирании с вращательным движением сопряженной детали (по сравнению с возвратно-поступательным перемещением) оказывают также влияние направления следов механической обработки относительно направления трения и условия смазывания мест контакта.

Таким образом, для обеспечения наибольшего эффекта от применения процесса дорнования с целью повышения износостойкости поверхностей отверстий у деталей, эксплуатируемых в условиях трения - скольжения, наиболее целесообразно обработанные детали использовать при работе с вращательным движением сопряженной детали. Однако исследования показывают, что дорнование позволяет также весьма существенно повысить износостойкость деталей, работающих в условиях совместного поступательного перемещения. Экономическая целесообразность использования обработанных деталей в таких условиях истирания также несомненна.

Проведенные испытания на износ в условиях трения - скольжения как при возвратно-поступательном, так и вращательном движениях истирающего эталона показали значительно большую износостойкость обработанных дорнованием образцов по сравнению с износом образцов, обработанных методами резания (протягиванием режущей протяжкой и растачиванием резцом). Применение процесса дорнования позволило уменьшить износ образцов, обработанных методами резания в 1,5-5 раз, а в отдельных случаях и больше.

Математическая обработка результатов проведенных исследований позволила получить зависимости для определения величин удельного износа обработанных дорнованием стальных изделий при истирании их в условиях трения - скольжения с нагрузками до  $20 \text{ кг/см}^2$  и скоростями относительного скольжения поверхностей до  $35 \text{ м/мин}$ . При этом удельный износ в значительной степени зависит от величины относительного натяга дорнования, свойств обрабатываемого материала, удельной нагрузки на образец в зоне трения, скорости истирания и пути трения.

При возвратно-поступательном перемещении сопряженной детали величина удельного износа  $i_d$

обработанных дорнованием деталей может быть определена по формуле:

$$i_q = 8,16 \cdot 10^{-2} \sigma_s^{-2} \cdot \lambda^{-0,92} \cdot p^{1,23} \cdot v^{-0,8} \cdot L^{-0,9}.$$

При вращательном движении сопряженной детали по уравнению следующего вида:

$$i_q = 8,8 \cdot 10^{-3} \sigma_s^{-2} \cdot \lambda^{-1} \cdot p^{1,4} \cdot v^{-0,8} \cdot L^{-0,9}$$

Здесь:  $i_q$  - удельный износ;

$\sigma_s$  - предел текучести исследуемого материала;

$\lambda$  - относительный натяг дорнования;

$p$  - удельная нагрузка на истираемую поверхность;

$v$  - скорость относительного скольжения;

$L$  - путь трения.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что износ деталей зависит от площади фактического контакта соприкасающихся поверхностей. Чем больше эта площадь, тем, естественно, больше и плотность контакта, а следовательно, при постоянной удельной нагрузке на поверхность давление на единичное пятно контакта будет меньше, что приведет и к меньшему износу поверхности.

В свою очередь, площадь фактического контакта зависит от удельной нагрузки на истираемую поверхность, микрогеометрии поверхности (высоты шероховатостей и радиуса закругления их вершин), механических свойств материала трущихся пар (предела текучести, модуля упругости, коэффициента Пуассона) и номинальной площади контакта.

Для определения фактической площади касания при контактировании двух шероховатых поверхностей в работе получена зависимость в виде:

$$A_z = A_a \left[ \delta + \frac{(B')^{\frac{1}{2}} \cdot v' \cdot \epsilon'_k}{2} \cdot \delta^{\frac{v'-1}{v'}} \right],$$

где:  $A_a$  - номинальная площадь касания;

$\delta = \frac{q_a}{q_m}$  - отношение номинального давления к давлению, переводящему выступ микрогребешка в пластическое состояние;

$\varepsilon'_k = \frac{dk}{h_{max_1} + h_{max_2}}$  - отношение критического сближения к максимальной высоте шероховатостей.

$\beta'_1 \beta'_2$  - константы, характеризующие кривую опорной поверхности.

При этом:  $\beta' = 0,9 (\beta_1 + \beta_2) \cup$

$$\beta' = \frac{K_1 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 (h_{max_1} + h_{max_2})^{\beta'}}{h_{max_1}^{\beta_1} + h_{max_2}^{\beta_2}}$$

Предложенная формула для определения фактической площади контакта при сопряжении двух шероховатых поверхностей позволяет по результатам лабораторных исследований, проводимых на малых образцах, судить об износе реальных деталей в эксплуатационных условиях. Воспользовавшись дополнительно предложенными в работе зависимостями для определения удельного износа, можно предварительно рассчитать ожидаемый износ обработанных дорнованием стальных деталей при эксплуатации их в условиях трения - скольжения.

Проведенные исследования позволили предложить соответствующие рекомендации по выбору оптимальных условий дорнования, обеспечивающих наибольшую износостойкость поверхностей отверстий при истирании их в условиях трения - скольжения.

В работе приведены специально-построенные номограммы для выбора оптимальных режимов процесса дорнования, обеспечивающих наибольшую износостойкость обработанных дорнованием поверхностей отверстий, истираемых в условиях трения - скольжения при наличии смазки. Номограммы охватывают широкую номенклатуру обрабатываемых де-



талей, изготавливаемых из сталей 10, 20, 45, 30ХГСА, меди М1, латуни Л70 и дуралюмина, с различными размерами обрабатываемых изделий (диаметрами отверстий от 2 до 200 мм и наружными диаметрами от 4 до 400 мм).

Рекомендуемые оптимальные натяги дорнования обеспечивают наибольшую износостойкость поверхностей отверстий, обработанных этим методом, при условии истирания их как с вращательным, так и с возвратно-поступательным перемещением сопряженных деталей. Однако в первом случае истирания износ поверхностей будет наименьшим.

Полученные в лабораторных условиях положительные результаты от применения процесса дорнования проверялись в производственных условиях.

Испытания проводились на ряде деталей мерительного инструмента и некоторых деталях электромашин в лабораторных условиях, а также непосредственно в цеховых условиях Челябинского завода мерительных инструментов и Челябинского завода электромашин.

Производственные испытания процесса на конкретных деталях подтвердили полученные выводы и дали положительные результаты.

## ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Сопровождающая процесс дорнования пластическая деформация, вызывающая сложное напряженное состояние металла, оказывает весьма благоприятное влияние на повышение износостойкости обработанных поверхностей при трении - скольжения.

Одним из основных параметров режимов дорнования, определяющих степень происходящей при этом пластической деформации является относительный натяг дорнования.

От величины относительного натяга зависят факторы, определяющие износостойкость обработанных дорнованием поверхностей отверстий: микрогеометрия обработанной поверхности, степень наклепа и глубина его проникновения, величина и характер распределения возникающих внутренних остаточных напряжений, а также образующаяся в процессе дорнования кристаллографическая направленность зерен деформированного металла.

2. Для определения состояния деформированного в процессе дорнования металла, определения степени происходящего при этом упрочнения, расчета площади дополнительных сдвигов металла и величин возникающих остаточных напряжений в работе получены ряд теоретических и опытных зависимостей.

3. Полученные на основании теоретических и экспериментальных исследований зависимости для расчета фактической площади контакта при соприкосновении двух шероховатых поверхностей и зависимости для определения удельного износа обработанных дорнованием поверхностей, позволяют производить расчет износа деталей в условиях эксплуатации.

4. Разработанные на основании результатов исследований номограммы позволяют производить выбор оптимального натяга дорнования, обеспечивающего наибольшую износостойкость обработанных дорнованием поверхностей.

5. Основные выводы работы прошли практическую апробацию на ряде конкретных производственных деталей. Результаты производственных испытаний подтвердили полученные закономерности.

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в следующих трудах автора.

1. Износостойкость и остаточные напряжения при дорновании. В кн. "Упрочнение деталей машин механическим наклепыванием", труды совещания по

упрочнению деталей машин, АН СССР, изд. "Наука", 1965.

2. Обработка отверстий многозубыми дорнами. "Станки и инструмент", № 4, 1962 (соавторы: Проскуряков Ю. Г., Куликовских В. А.).

3. Повышение износостойкости поверхностей дорнованием. "Вестник машиностроения", № 9, 1963 (соавтор Проскуряков Ю. Г.).

4. Износоустойчивость поверхности отверстий, обработанных дорнованием. "Известия высших учебных заведений", Машиностроение, № 11, 1963 (соавтор Проскуряков Ю. Г.).

5. Дорнование втулки звена гусеницы трактора С-100. "Технико-экономический бюллетень", СНХ Челябинского адм. эк. района, г. Челябинск, № 7, 1960 (соавторы: Проскуряков Ю. Г., Куликовских В. А.).

6. Остаточные напряжения в деталях, обработанных дорнованием. В сб. статей "Современные способы и технология обработки деталей упрочняюще-калибрующими инструментами", ЧПИ, г. Челябинск, 1962 (соавтор Проскуряков Ю. Г.).

7. Обработка деталей типа втулок упрочняюще-калибрующими инструментами. В сб. статей "Современные способы и технология обработки деталей упрочняюще-калибрующими инструментами", ЧПИ, г. Челябинск, 1962 (соавторы: Проскуряков Ю. Г., Куликовских В. А.).

8. Исследование процесса дорнования отверстий ролика и втулки звена трактора. В сб. статей "Современные способы и технология обработки деталей упрочняюще-калибрующими инструментами", ЧПИ, г. Челябинск, 1962 (соавторы: Проскуряков Ю. Г., Куликовских В. А.).

9. Исследование методов упрочняюще-калибрующей обработки некоторых деталей мерительного инструмента. Отчет по хозяйственной теме № 63/15-62, зарегистрированный в Государствен-

ном комитете по делам изобретений и открытий СССР. Удостоверение о регистрации № 43064 от 19.III.1964 г.

10. Исследование процесса дорнования отверстий при обработке некоторых деталей. Тезисы докладов на XIII научно-технической конференции ЧПИ, ЧПИ, г. Челябинск, 1960. (соавторы Проскуряков Ю.Г., Куликовских В. А.).

11. Износостойкость поверхностей отверстий, обработанных дорнованием. Тезисы докладов на XIV научно-технической конференции ЧПИ, ЧПИ, г. Челябинск, 1961.

12. Износостойкость обработанных дорнованием отверстий в зависимости от режимов деформирования и условий последующей эксплуатации. Тезисы докладов на XV научно-технической конференции ЧПИ, ЧПИ, г. Челябинск, 1962.

13. Остаточные напряжения, возникающие при различных режимах обработки отверстий дорнованием. Тезисы докладов на XV научно-технической конференции ЧПИ, ЧПИ, г. Челябинск, 1962.

14. Износостойкость поверхностей деталей машин, обработанных упрочняюще-калибрующими методами. Тезисы докладов на I-й научно-технической конференции молодых ученых и инженеров г. Челябинска, ГК ВЛКСМ, Областной Совет НТО и СНХ, г. Челябинск, 1963.

15. Исследование величины и характера распределения остаточных напряжений, возникающих при различных режимах дорнования отверстий, Тезисы докладов на XVI научно-технической конференции ЧПИ, ЧПИ, г. Челябинск, 1963.

Работа докладывалась:

1) на совещании по упрочнению деталей машин, проводимому в мае 1962 г. Комиссией по технологии машиностроения Института машиноведения АН СССР с участием Государственного Комитета Совета Министров СССР по координации научно-исследовательских работ;

2) на XIII, XIV, XV и XVI научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1960, 1961, 1962 и 1963 гг.