



Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

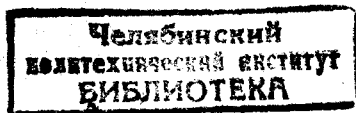
На правах рукописи

КОВАЛЕВ РУДОЛЬФ МАКСИМОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКАТЫВАНИЯ
ШАРИКОМ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ И РАЗРАБОТКА
МЕТОДА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ
УПРОЧНЯЮЩЕ-КАЛИБРУЮЩИХ РЕЖИМОВ

Специальность 05.02.08 -
"Технология машиностроения"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Челябинск
1974

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

Научные руководители:

доцент, кандидат технических наук В.М. Меньшаков;
доцент, кандидат технических наук А.Н. Раевский.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Д.Д. Папшев;
кандидат технических наук, доцент Я.А. Симакин.

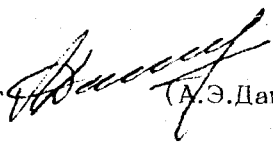
Ведущее предприятие - Челябинский механический завод.

Автореферат разослан " ____ " _____ 197__ г.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 197__ г.,
в 15 часов, в аудитории 244 (конференцзал) на заседании
Совета по присуждению ученых степеней машиностроитель-
ных факультетов Челябинского политехнического института
им. Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке инсти-
тута.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интере-
сующихся темой диссертации, принять участие в заседании
Ученого Совета или прислать свои отзывы в 2-х экземпля-
рах, заверенных гербовой печатью, по адресу: 454044,
г. Челябинск-44, проспект им. В.И. Ленина, 76.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент  (А.Э. Даммер)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Успешное решение задач, поставленных XXIV съездом КПСС в области дальнейшего экономического развития нашей страны, неразрывно связано с повышением качества и надежности выпускаемой продукции. Известно, что надежность работы машин и механизмов зависит от износостойкости, долговечности, усталостной прочности и др. эксплуатационных свойств деталей. Простым и эффективным способом упрочнения является процесс поверхностного пластического деформирования (ППД) различными инструментами, среди которых существенная роль принадлежит процессу деформирования шариком (рис. 1). Совершенствованию указанного процесса и посвящается выполненная работа.

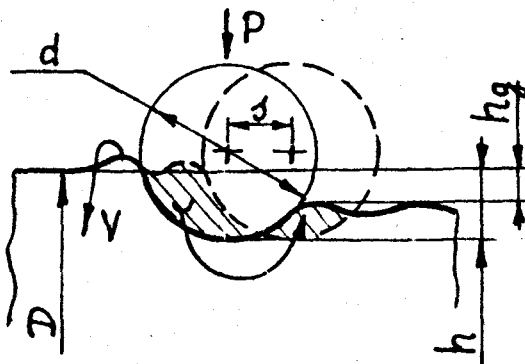


Рис. 1. Схема накатывания и образования накатанной поверхности

Актуальность темы определяется тем, что существующие рекомендации для проектирования технологических процессов с применением ППД шариком настолько разноречивы, что не позволяют однозначно решить задачу выбора оптимального режима накатывания. Одной из главных причин отмеченного является отсутствие единого и определяющего технологического критерия оптимальности режима.

Целью работы явилась разработка метода расчета оптимальных режимов ППД шариком по исходным данным, задаваемым чертежом детали, исключающего необходимость проведения экспериментов в условиях производства и обеспечивающего наибольший эффект упрочнения детали при максимальной производительности процесса.

Общая методика исследования. Работа состоит из теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретический анализ на основе приближенных вычислений и упрощенных схем процесса накатывания, качественно согласующихся с теориями упругости и пластичности, позволил установить зависимости площади пятна контакта, осевой и тангенциальной сил, упругой компоненты сближения и других показателей от параметров ППД.

В результате экспериментальных исследований долговечности, износостойкости, усталостной прочности и характеристик поверхностного слоя (микротвердость и остаточные напряжения) определено основное условие оптимальности накатывания и установлена целесообразность ППД перед хромированием или закаливанием с высокими скоростями нагрева под закалку. Получена обобщенная эмпирическая зависимость определения припуска под накатывание. Исследования проводились на образцах из конструкционных сталей марок 30, 35, 45, 50, 50Г, 65Г.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований с учетом литературных данных разработан метод расчета оптимальных режимов накатывания.

Научная новизна работы заключается в обобщении результатов исследований процесса ППД шариком, в выводе основного уравнения накатывания, что позволило разработать инженерную методику расчета оптимальных режимов накатыва-

ния. Впервые предложен метод расчета упругой компоненты сближения для условий накатывания деталей шариком и установлена целесообразность проведения операции ППД перед закаливанием с высокими скоростями нагрева.

Практическая ценность и реализация результатов. Разработанная методика инженерных расчетов режимов накатывания существенно упрощает и ускоряет внедрение операции ППД, гарантируя получение максимального эффекта упрочнения, что особенно важно в условиях серийного, мелкосерийного и индивидуального производства. Результаты исследований внедрены на Челябинском механическом заводе и используются другими предприятиями. Внедрение проводилось на деталях пяти групп, эксплуатируемых в различных условиях. Годовой экономический эффект в народном хозяйстве в результате повышения долговечности деталей, обеспечиваемой ППД, составил 110000 рублей.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, Ижевского механического института, Красноярского политехнического института, Ростовского-на-Дону института механизации сельского хозяйства, Уральского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта, на научно-техническом семинаре в Московском доме научно-технической пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, научно-техническом семинаре кафедры "Станки и инструмент" и совместном заседании кафедр "Технология металлов", "Технология машиностроения" и "Станки и инструмент" ЧПИ им. Ленинского комсомола, научно-техническом семинаре кафедры "Технология нефтяного и химического машиностроения" Куйбышевского политехнического института им. В.В. Куйбышева.

Публикация. По теме диссертации опубликовано 14 работ.

Объем работы. Диссертационная работа, состоящая из введения, пяти глав и общих выводов, содержит 157 страниц текста, 34 таблицы, 78 рисунков, список литературы, включающий 120 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 10 приложений.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Анализ литературных данных и промышленного опыта в области ППД позволяет отметить следующее.

1. В качественном отношении явление упрочнения при ППД достаточно исчерпывающе объясняется теорией дислокаций и химическими процессами, происходящими в металле при его деформировании.

2. Работами П.Е. Дьяченко и З.М. Грозинской, Е.Г. Ковалова и Г.Б. Армадеровой, И.В. Кудрявцева и Д.Д. Папшева, Ю.Г. Проскурякова, В.М. Меньшакова и И.В. Поздняковой, Ю.Г. Шнейдера и П.Г. Алексеева, Л.М. Школьника и В.И. Шахова, В.М. Торбило и А.А. Хворостухина, А.А. Каменской и В.И. Неверова и других исследователей установлено положительное влияние ППД на долговечность, усталостную и контактную прочность и износостойкость деталей машин.

3. Сопоставительный анализ ППД роликом, шариком и алмазным выглаживанием позволил определить области их рационального использования. Так, накатывание шариком целесообразно применять при обработке деталей средних размеров достаточно высокой жесткости (прочность материала не лимитируется) с исходной шероховатостью поверхности пятого и шестого классов.

4. Наиболее приемлемыми для расчета режимов ППД шариком являются методики, предложенные Д.Д. Папшевым и П.Г. Алексеевым. Методики основаны на выдерживании рекомендуемых средних давлений, определяемых по формуле

$q = [q] = P/F$. Трудность их использования заключается

в отсутствии достаточно достоверных формул, раскрывающих зависимость

$$F = f(p, z, v, D, d, \sigma_T) \quad (1)$$

в специфических условиях процесса накатывания. Д.Д. Папшев предлагает, в частности, формулу

$$F^n = \frac{4d}{3} \sqrt{\frac{D}{D+d}} \left[W + \sqrt{W(hg+W)} + \frac{1}{4} \sqrt{Whg} \right], \quad (2)$$

П.Г. Алексеев -

$$F^A = \frac{4d}{3} \sqrt{\frac{D}{D+d}} (h_g + W), \quad (3)$$

где F - площадь контакта;
 P - сила воздействия шарика на деталь;
 V, S - скорость и подача при накатывании;
 D, d - диаметры детали и шарика;
 σ_T - предел текучести материала детали;
 W, h_g - упругая компонента сближения и разница в размере детали по радиусу до и после накатывания.

Анализ формул показал, что они не удовлетворяют крайним условиям (абсолютно упругое и абсолютно пластичное тело) и их использование затруднено из-за отсутствия метода нахождения величины W . Кроме того, h_g определяется экспериментально, т.е. требуется пробное накатывание, и при соответствующих сочетаниях факторов процесса может быть равно нулю или иметь отрицательное значение (увеличение диаметра детали после накатывания), хотя площадь контакта в нуль не обращается. Таким образом, зависимости (2) и (3) имеют частный характер.

5. Невозможно назначить или рассчитать режимы накатывания, обеспечивающие рекомендуемые величины оптимальных давлений с одновременным выполнением требований чертежа по шероховатости поверхности, максимальной производительности процесса и припуску под накатывание.

6. Обширные экспериментальные данные исследований и промышленного опыта, несмотря на их частный характер, в целом свидетельствуют о необходимости и возможности создания инженерной методики расчета оптимальных режимов ППД шариком.

7. Опыт предприятий металлургической промышленности (работы Л.М. Бернштейна, И.А. Одингга, В.Д. Садовского, Р.И. Энтина, А.П. Гуляева, М.Г. Лозинского, Н.С. Алферовой и других) указывает на возможность применения ППД шариком как предварительной операции перед термической обработкой. Однако на машиностроительных предприятиях такая практика отсутствует.

В соответствии с изложенным поставлены следующие основные задачи.

1. Уточнить формулу определения площади контакта как основного фактора, определяющего достоверность вычисления среднего давления при накатывании.

2. Разработать метод нахождения величины упругого сближения шарика и детали при ППД.

3. Установить аналитические зависимости для расчета величин осевой и тангенциальной составляющих силы накатывания.

4. Исследовать роль среднего давления в контакте при ППД, найти его оптимальное значение с учетом марки стали обрабатываемой детали.

5. Исследовать изменения размера детали до и после накатывания в зависимости от параметров процесса.

6. Экспериментально установить целесообразность применения ППД шариком как предварительной операции перед закаливанием и хромированием и исследовать с этой целью преимущество методики расчета режимов финишной операции ППД.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные допущения. При теоретических исследованиях приняты следующие допущения.

1. Процесс накатывания представляем в виде ряда последовательных сближений поверхностей контактирующих тел в дискретных положениях (рис. 2. угол α).

2. Физико-механические свойства материала шарика описываются свойствами абсолютно упругой среды, а материала детали — свойствами упруго-пластической среды без упрочнения.

3. Силами трения в контакте и сопротивления пластическому течению материала детали пренебрегаем. Реакция детали равна и противоположно направлена силе, приложенной к шарiku, и проходит через его центр под некоторым углом давления α к оси детали.

4. С учетом величины отношений шероховатости исходной

поверхности детали к шероховатости поверхности шарика $R_z/R_{z_{\text{ш}}} \approx 200$ и шероховатости накатанной поверхности к шероховатости поверхности шарика $R_z/R_{z_{\text{ш}}} \approx 50$ поверхность шарика принимается за правильную сферу.

5. Учитывая, что слой металла, находящиеся под слоем пластически деформированных микровыступов, работают подобно слоям тела с идеально гладкой сплошной поверхностью (следствие из принципа Сен-Венана, подтвержденное экспериментально) и их поведение при деформировании определяется закономерностями теорий пластичности и Герца-Беляева, принимаем, что поверхности детали до и после накатывания есть правильные цилиндры, радиусы которых отличаются на величину h_g . Цилиндры сопрягаются между собой галтелью с радиусом, равным радиусу сферы шарика.

Таким образом, задача сводится к исследованию контакта двух тел, первым из которых служит шар радиусом r из абсолютно упругого материала, а вторым — в зоне контакта "бугорок" с вершиной, образованной пересечением цилиндрической поверхности радиусом R с галтелью радиусом r , из упруго-пластичного материала. Это приводит к резкому отличию формы пятна контакта от эллипса и является одной из причин невозможности применения решений Беляева — Герца или Штаермана.

Основные результаты теоретических исследований сводятся к следующему:

1. Площадь контакта. Принятые допущения и геометрическая модель формирования накатанной поверхности, разработанная Д.Д. Папшевым, позволили схему контактирования упругих шара и цилиндра (по Н.М. Беляеву) принять за основу схемы контакта упругого шара с упруго-пластическим цилиндром (рис. 2). Погрешности, вызываемые такой заменой, в дальнейшем учитываются коэффициентом M , отражающим геометрические характеристики соприкасающихся тел и упругопластические свойства материала детали.

Принятая схема контакта практически совпадает с моделью, предложенной Д.Д. Папшевым, однако вычисление

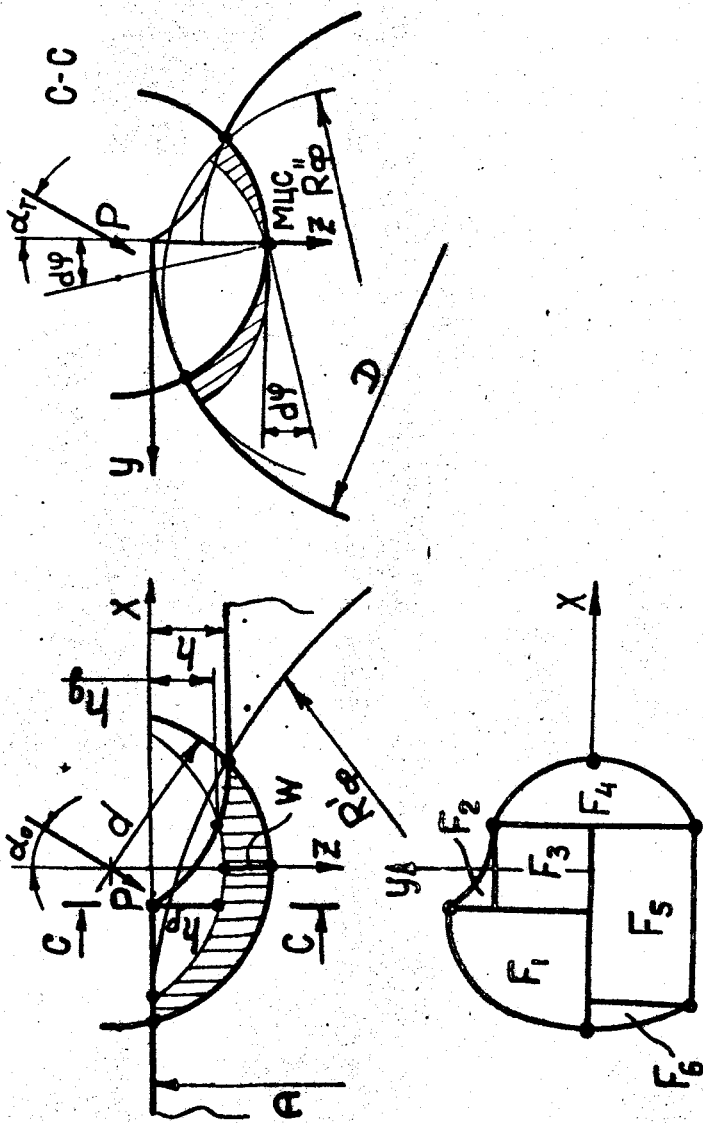


Рис. 2. Схема контакта шарика и детали при накатывании

площади контакта уточняется путем введения величины h (максимальной пластической деформации в плоскости наибольших смещений), а не h_g . Наши исследования позволили формулу площади контакта представить в виде

$$F = \frac{2d}{3} \sqrt{\frac{D}{D+d}} \cdot h \cdot K_h, \quad (4)$$

где
$$K_h = \sqrt{\Psi + \varphi} \left(\sqrt{\Psi + 1} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - \varphi} + \frac{1}{4} \sqrt{\varphi} \right) + \sqrt{\Psi} \left(\sqrt{1 - \varphi} + 2 \sqrt{\Psi + \frac{\varphi}{4}} + \sqrt{1 + \Psi} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \sqrt{\varphi} \right); \quad \Psi = \frac{W}{h}; \quad \varphi = \left(\frac{s}{\sqrt{dh}} \right)^{1/2}.$$

2. Упругая компонента сближения. Методика определения упругого сближения основана на использовании способа последовательных приближений и введении понятия "фиктивное тело", кривизны которого зависят от параметров процесса накатывания:

$$W = \frac{W_{кр}}{\varphi}, \quad (5)$$

где
$$W_{кр} = \frac{8,18d}{2 \left(\frac{D+d}{D} \right)^{1/2}} \left(\frac{\sigma_T}{0,63E} \right)^2; \quad \varphi = \frac{4f_A}{n^{1/2}}; \quad n = \frac{f_A}{f_B};$$

$$f_A = \frac{(\Psi + 1)^{3/2} + \frac{2}{3} \varphi^2 + \Psi \sqrt{\Psi + \frac{\varphi}{4}} - 1}{(\sqrt{\Psi + 1} + \sqrt{\Psi + \varphi/4})^3}; \quad f_B = \frac{(\Psi + \varphi)^{3/2} + (\Psi + \frac{1}{2} \varphi) \sqrt{\Psi + \frac{\varphi}{4}}}{(\sqrt{\Psi + \varphi} + \sqrt{\Psi + \varphi/4})^3}.$$

Коэффициенты K_h , φ , n могут быть найдены по рабочим графикам или таблицам, имеющимся в диссертации, в зависимости от Ψ и φ .

3. Распределение напряжений на поверхности детали вне зоны контакта. В работах Н.М. Беляева и А.Н. Динника установлено, что при контакте двух упругих тел опасная точка, в которой раньше всего возникает пластическая деформация, лежит на линии центров тел в глубине от поверхности на расстоянии $(0,5 \dots 0,78) b$, где b - малая полуось эллипса контакта.

Из теории пластичности известно, что для осуществления деформации пластического тела необходимо, чтобы оно и тело хотя бы часть граничной поверхности, свободной от

закрепления. Такой поверхностью при контакте двух тел является поверхность, лежащая вне зоны контакта. Решением уравнения потенциала для поверхности тел вне зоны их контакта получено:

$$\left. \begin{aligned} &\text{для оси } x \\ \sigma_x = -\sigma_y = -\frac{3P(1-2\nu)}{2\pi} \cdot \frac{\beta}{ab} \cdot \frac{1}{e^2} \left[1 - \frac{x}{ae} \operatorname{arctg} \frac{ae}{x} \right]; \\ &\text{для оси } y \\ \sigma_x = -\sigma_y = -\frac{3P(1-2\nu)}{2\pi} \cdot \frac{\beta}{ab} \cdot \frac{1}{e^2} \left[1 - \frac{y\beta}{be} \operatorname{arctg} \frac{be}{y\beta} \right]; \\ &\text{для любой оси -} \\ &\sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 . \end{aligned} \right\} (6)$$

Анализ зависимостей (6) показал локальность распределения поверхностных напряжений. Следовательно, среднее давление в зоне контакта может быть принято в качестве основного технологического критерия ППД шариком, так как оно однозначно и с достаточной полнотой характеризует силовое взаимодействие контактирующих тел, что объясняет экспериментальные результаты исследований возникновения тепловых импульсов (Д.Д. Папшев) и распределения твердости в очаге деформации (О.О. Куликов и В.М. Браславский).

4. Осевая и тангенциальная силы при накатывании. Рассматривая уравнения статического равновесия системы сил и предполагая, что между локальным упругим смещением W_x и соответствующим удельным усилием имеется пропорциональная зависимость, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_0 &= \frac{1}{3\sqrt{d}} \left[\sqrt{h} + \sqrt{h+W} - \frac{1}{2} \sqrt{h \cdot \varphi} - \sqrt{W} - \frac{h\varphi}{4} + \frac{g}{2} \sqrt{h(1-\varphi)} \right]; \\ \operatorname{tg} \alpha_T &= \frac{4}{3d} \sqrt{\frac{Dd}{D+d}} (\sqrt{W+h\varphi} + \sqrt{W}); \\ P_0 &= P \cdot \operatorname{tg} \alpha_0; \quad P_T = P \cdot \operatorname{tg} \alpha_T . \end{aligned} \right\} (7)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Пластическая компонента сближения и изменение размера детали. С помощью теоретических исследований установлено, что ряд существенных характеристик процесса накатывания поддается расчетному определению, если известны величина пластической компоненты сближения h и изменение размера детали h_g . Установить значения h и h_g аналитически не представляется возможным из-за трудности математического описания физических процессов, происходящих при переходе материала детали из упругого состояния в пластичное. В связи с этим предложены эмпирические зависимости:

$$\left. \begin{aligned} h &= 1938 \frac{\rho^{1/6}}{\sigma_T} \left(\frac{D+d}{D\sqrt{d}} \right)^2 \text{ мкм}; \\ h_g &= \frac{h}{57,8} \left(163 - \frac{D}{D+d} V \right) \left(0,355 - \frac{D}{D+d} S \right) \text{ мкм}. \end{aligned} \right\} (8)$$

Расчетные данные удовлетворительно совпадают с экспериментальными (рис. 3); максимальные отклонения составляли - 15,2 и +5,8%. Статистический анализ величины h_g методом больших выборок выявил несовпадение расчетных и экспериментальных данных в пределах 5%.

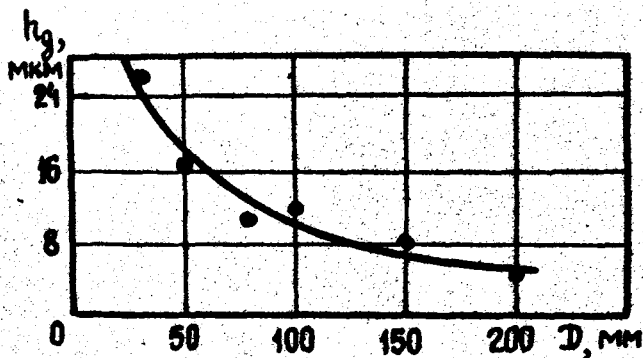


Рис. 3. Влияние D и V при постоянном числе оборотов на h_g

2. Силы при накатывании. Экспериментальная проверка формул (7) необходима как критерий оценки возможности их применения в расчетной практике. С учетом того, что формулы получены на основе допущений, аналогичных при выводе формулы площади пятна контакта, их экспериментальное подтверждение является одновременно косвенным доказательством последней.

Экспериментальную проверку формул проводили в три этапа.

I. Определение углов давления при различных скоростях накатывания и постоянных величинах P, β, σ_T, D, d . Скорость накатывания изменялась от 9 до 100 м/мин, т.е. во всем диапазоне скоростей, применяемых при накатывании.

II. Определение углов давления от соотношения диаметров D и d . Учитывая, что $h^2 \gg W^2$, и подставляя h из формулы (8), получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha_0 \approx B \frac{D+d}{Dd} \sqrt[6]{d}; \quad \operatorname{tg} \alpha_T \approx C \sqrt{\frac{D+d}{D}} \frac{\sqrt[6]{d}}{d}.$$

При неизменных P, β, V, σ_T должны быть постоянными B и C , а также соблюдена линейная зависимость $\operatorname{tg} \alpha_0$ и $\operatorname{tg} \alpha_T$ от любых сочетаний D и d . Принималось $D = 30 \dots 200$ мм; $d = 5 \dots 15$ мм.

III. Справедливость зависимостей (7) от P, β, σ_T проверяется сопоставлением расчетных величин с экспериментальными. В эксперименте варьировались P, β и σ_T ; D и d оставались постоянными.

Исследование сил при накатывании проводилось с помощью 3-компонентного динамометра УДМ-600 с соответствующей аппаратурой. Анализ показал удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных (табл. 1 и 2).

Данные таблиц свидетельствуют о справедливости предложенных зависимостей и правомерности принятых допущений.

3. Область оптимальных давлений. Основное условие накатывания. Задача исследований заключается в выявлении величины среднего давления в контакте на различные харак-

Зависимость углов давления α_0 и α_T от режимов
накатывания ($D = 50$ мм, $d = 12,7$ мм)

| Параметры варианта | | Углы давления | $t_g \alpha_{\text{эксп}} \times 10^2$ | | | | | |
|--------------------|----------------|------------------|--|----------------------------------|------|------|------|------|
| P , кг | S , мм/об | | σ_T , кг/мм ² | Скорость накатывания V , м/мин | | | | |
| 60 | 0,07 | 40 | 9,5 | 25,12 | 31,4 | 62,8 | 78,5 | 94,0 |
| | | | 7,3 | - | 8,2 | 7,2 | 7,8 | 8,5 |
| 80 | 0,12 | 40 | 4,7 | - | 4,6 | 4,3 | 4,0 | 4,8 |
| | | | 6,9 | 6,7 | 7,8 | 7,3 | 8,1 | 7,5 |
| | | | 4,5 | 5,0 | 4,2 | 4,9 | 4,7 | 4,5 |
| | | | | | | | | 4,66 |

Зависимость углов давления α_0 и α_T от соотношения диаметров детали и шарика (сталь 50Г,

$\sigma_T = 40 \text{ кг/мм}^2$, $f = 0,12 \text{ мм/об}$, $P = 60 \text{ кг}$, $V = 62,8 \text{ м/мин}$)

| Диаметр, мм детали D | | Диаметр, мм шарика d | $\frac{D+d}{Dd} \sqrt{Vd}$ | $\sqrt{\frac{D+d}{D} \cdot \frac{Vd}{d}}$ | Экспериментальные | | |
|----------------------------|------|-------------------------------|----------------------------|---|------------------------|------------------------|-------|
| | | | | | $t_{gd_0} \times 10^2$ | $t_{gd_T} \times 10^2$ | C |
| 50 | 12,7 | | 0,151 | - | 7,82 | - | 0,508 |
| | | | - | 0,135 | - | 4,86 | - |
| 30 | 12,7 | | 0,171 | - | 8,28 | - | 0,485 |
| | | | - | 0,143 | - | 4,29 | - |
| 80 | 5,0 | | 0,352 | - | 17,60 | - | 0,500 |
| | | | - | 0,270 | - | 8,92 | - |

теристики обработанной детали, т.е. в получении зависимости типа

$$a_i = f(q), \quad (9)$$

где a_i - исследуемая характеристика детали или качества поверхностного слоя;
 q - среднее давление в контакте при накатывании.

Величину среднего давления в контакте будем называть оптимальной ($opt q$), если при таком давлении операция ППД обеспечивает оптимальную величину какой-либо характеристики детали (a_i), т.е. $opt q_a$ есть значение q при экстремальном значении a . Границы области определяем из условия

$$|a - ext a| \leq 0,1 |ext a|. \quad (10)$$

Далее необходимо установить зависимость оптимального давления от предела текучести материала, т.е.

$$opt q = f(\sigma_T).$$

Образцы детали на три группы:

- А** - не подлежащие закаливанию или хромированию;
- Б** - подлежащие закаливанию;
- В** - имеющие гальванообработку.

Исследования на долговечность и износостойкость проводились на типовой машине трения МИ-1М, а также на созданных под руководством автора специальных многоместных установках с самоустанавливающимися контртелами. Критериями долговечности и износостойкости служили: количество циклов нагружения до достижения определенной величины линейного износа при низких уровнях напряжений ($p' = 42,6 \text{ кг/мм}^2$) и количество циклов нагружения до появления первых признаков разрушения поверхности при высоких уровнях напряжений ($p'' = 153 \text{ кг/мм}^2$). Линейный износ определялся методом вырезанных лунок по предложенной автором схеме (авт. свид. № 324548 от 1/X-71 г.). Нанесение и измерение лунки проводилось на горизонтальном компораторе ИЗА-2. Разрушение поверхности контролировалось на металлографическом микроскопе МИМ-6.

Микротвердость исследовалась с помощью прибора ПМТ-3, шероховатость поверхности - двойного микроскопа МИС-11 и профилометра - профилографа завода "Калибр", а остаточные напряжения - методом проф. Н.Н. Давиденкова путем электрохимического полирования внутренней поверхности разрезного кольца на специальной установке с записью деформации самописцем КСП-4.

Результаты исследований стали 50Г (рис. 4) показывают, что эксплуатационные характеристики (износ, долговечность) и характеристики поверхностного слоя (микротвердость, остаточные напряжения) накатанного образца, за исключением шероховатости поверхности, качественно зависят от давления накатывания одинаковым образом и имеют экстремум при одном и том же давлении накатывания (для стали 50Г $opt q = 396 \text{ кг/мм}^2$).

В табл. 3 приведены значения $opt q$, полученные в настоящей работе, а также взятые из литературных источников для различных сталей и пересчитанные по методике, предложенной в диссертационной работе. Из таблицы видно, что отношение $\frac{opt q}{\sigma_T} \approx const$.

Анализ графиков различных характеристик приводит к выводу о том, что в расчетах оптимальных режимов накатывания следует выдерживать условие

$$q = 9\sigma_T. \quad (11)$$

Исследование по тем же характеристикам образцов, закаленных ТВЧ после накатывания, показало, что основное условие накатывания (11) сохраняется и для этого случая. Кроме того, установлено, что ППД перед закаливанием дополнительно повышает эксплуатационные характеристики детали и качественные характеристики поверхностного слоя. Коэффициент оценки эффективности ППД перед закалкой определяется по формуле

$$K = \frac{HV_{нз} - HV_{заг}}{HV_3 - HV_{заг}}, \quad (12)$$

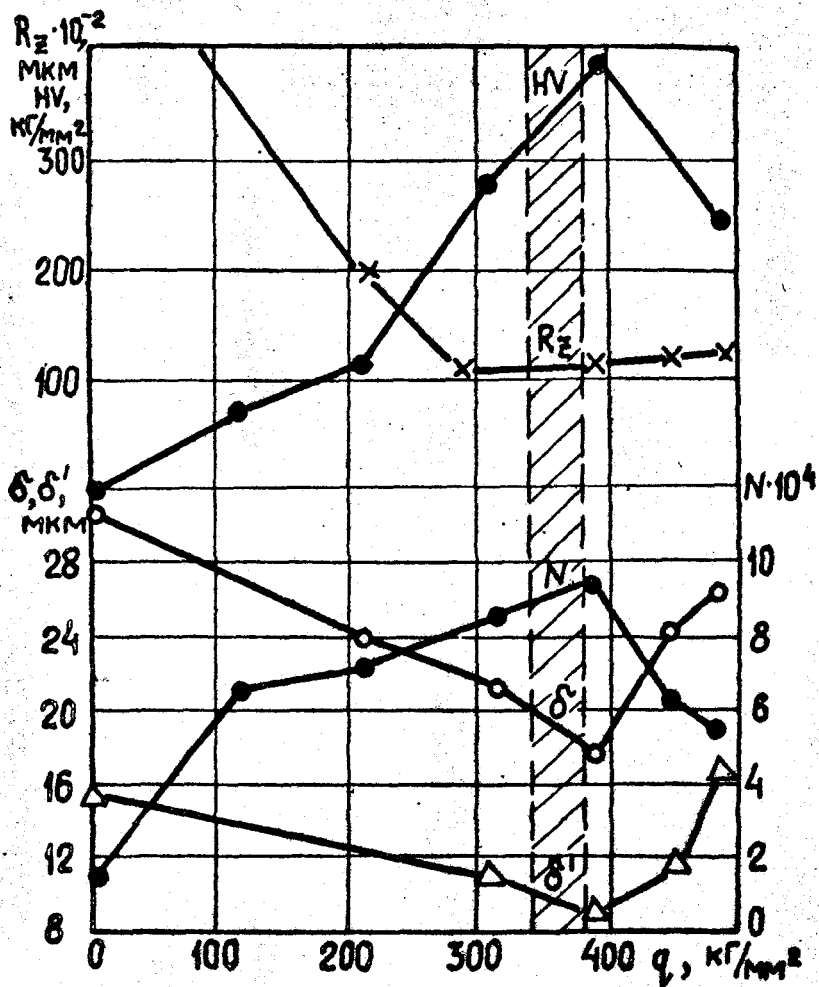


Рис. 4. Обобщенная область $opt q$ при накатывании по износу δ и δ' , долговечности N , микротвердости HV и шероховатости поверхности R_z

Оптимальные давления накатывания

| Вид обра-ботки | Характеристика | Автор исследова-ния | Марка стали | $\sigma_T, 2$ кг/мм ² | $\sigma_{opt} q,$ кг/мм ² | $\frac{\sigma_{opt} q}{\sigma_T}$ |
|----------------|--|---------------------|-------------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Группа А | Прирост твердости ΔH_V | Д.Д. Пап-шев | У 8 | 47 | 448 | 9,54 |
| | Линейный износ δ | Р.М. Кова-лев | 50Г | 40 | 396 | 9,90 |
| | Усталостная прочность N_{y_0} | Р.М. Кова-лев | 45 | 36 | 305 | 8,48 |
| | Остаточные напряжения σ_r | В.И. Неве-ров | 40Х отож | 30 | 277 | 9,23 |
| | Прирост твердости ΔH_V | Д.Д. Папшев | 20 | 25 | 214 | 8,56 |
| Группа Б | Линейный износ, δ_1 | Р.М. Ковалев | 50Г | 40 | 396 | 9,90 |
| | Долговечность при $R' = 42,6$ кг/мм ² | Р.М. Кова-лев | 50Г | 40 | 396 | 9,90 |
| | Долговечность при $R'' = 153$ кг/мм ² | Р.М. Кова-лев | 50Г | 40 | 396 | 9,90 |

коэффициент оценки сохранения наклепа -

$$K_{\text{сохр}} = \frac{1}{\Delta HV_H} \left(\frac{HV_{H3} \cdot \Delta HV_3}{HV_3 \cdot \Delta HV_{H3}} - 1 \right), \quad (13)$$

- где $HV_{3\text{заг}}$ - твердость поверхностного слоя образца-заготовки;
 HV_3 - то же закаленного образца;
 HV_{H3} - то же накатанного и закаленного образца;
 ΔHV_H - степень повышения твердости образца-заготовки после накатывания;
 ΔHV_3 - то же после закалки;
 ΔHV_{H3} - то же после накатывания и последующей закалки.

Для стали 50Г $K = 2,06$ и $K_{\text{сохр}} = 0,905$, что свидетельствует о сохранении эффекта упрочнения от накатывания.

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Проверочный расчет режимов накатывания

Исходные данные: D мм; σ_T кг/мм²; E кг/мм²; R_z мкм.

Диаметр шарика $d = (1 \dots 1,5) \sqrt{D}$ мм

Сила накатывания $P \approx 0,15 d \sigma_T$ кг

Пластическая компонента $h = 1938 \frac{P^{1/6}}{\sigma_T d^{2/3}} \left(\frac{D+d}{D} \right)^2$ мкм

Подача $s = 2 \sqrt{d R_z}$ мм/об,

$$s \leq [s] = 0,283 \frac{D+d}{D}$$

Критическое упругое смещение $W_{кр} = \frac{8,18d}{2 \left(\frac{D+d}{D} \right)^{1/2}} \left(\frac{\sigma_T}{0,63E} \right)^2$

Коэффициент подачи $\varphi = \left(\frac{s}{\sqrt{d h}} \right)^{1/2}$

Упругое смещение $W = \frac{W_{кр}}{\varphi}$; $\psi = \frac{W}{h}$.

По методу последовательного приближения $\varphi = f(\varphi, \psi)$, определяется по графику, $W_T = W_{кр}$ и т.д.

Площадь пятна контакта $F = \frac{2}{3} dh \sqrt{\frac{D}{D+d}} \cdot K_h$,
 $K_h = f(\varphi, \psi)$,
 определяется по графику

Проверка расчета по давлению в контакте

$$q = \frac{P}{F}; 8,50 \sigma_T \leq q < 9,50 \sigma_T$$

Скорость накатывания

$$V \leq 65 \frac{D+d}{D} \text{ м/мин}$$

Припуск под накатывание

$$2hg = \frac{2h}{5,78} \left(163 - \frac{D}{D+d} V \right) \left(0,355 - \frac{D}{D+d} S \right) \text{ мм}$$

Диаметр заготовки

$$D_{заг} = D + 2hg \text{ мм}$$

Промышленное внедрение результатов исследования проводилось в основном на Челябинском механическом заводе на деталях пяти групп, эксплуатируемых в различных условиях.

I группа - детали, имеющие в эксплуатации раскатывание рабочей поверхности. Как правило, они работают при высоких контактных нагрузках в условиях трения качения при отсутствии проскальзывания ($\lambda = 0$), имеют шероховатость поверхности $\nabla 4 \dots \nabla 5$ и неудовлетворительные условия смазки.

II группа - детали, характеризующиеся осповидным износом рабочей поверхности. Эксплуатируются в условиях трения качения при высоких контактных нагрузках с коэффициентом проскальзывания λ до 8%. Условия смазки удовлетворительные. Шероховатость рабочей поверхности деталей не ниже $\nabla 7$.

III группа - детали с тепловым износом. Эксплуатируются в режиме тормоза, т.е. при сухом трении и $\lambda = 100\%$, повышенной температуре рабочей зоны и периодическом включении в работу.

IV группа — детали, имеющие окислительный износ. Чаще всего это цапфы валов, работающие в условиях трения скольжения ($\lambda = 100\%$) при хорошей смазке и защите от загрязнения, шероховатость поверхности $\nabla 7 \dots \nabla 9$.

V группа — детали с недостаточной выносливостью при знакопеременных нагрузках. К ним относятся различные валы и оси, работающие на изгиб при вращении.

Ряд деталей I, II и III групп подвергался закаливанию после ППД. Во всех случаях операция ППД повысила долговечность деталей на 25–50% в зависимости от условий их эксплуатации.

Экономический эффект от внедрения результатов исследований подсчитывался по формуле

$$\mathcal{E}_i = (C_1 \cdot K_g - C_2) N - E_n A \quad (14)$$

и составил по пяти группам деталей

$$\mathcal{E} = \sum_{i=I}^{i=V} \mathcal{E}_i = 110 \text{ 000 рублей,}$$

где C_1 и C_2 — себестоимость детали до и после внедрения операции ППД;

K_g — коэффициент увеличения долговечности;

N — годовой выпуск деталей;

E_n — нормативный коэффициент эффективности;

A — единовременные затраты при внедрении.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также анализа и обобщения литературных данных установлено, что величину среднего давления в контакте при накатывании деталей шариком можно считать универсальным показателем и использовать в качестве основного критерия, имеющего решающее влияние на эффективность обработки. Найдено основное условие накатывания

$$q = 96\tau.$$

Справедливость условия проверена на деталях, изготовленных из различных марок углеродистых качественных сталей.

2. Предложена уточненная формула для определения площади пятна контакта. Область ее применения по сравнению с известными существенно расширена. Получены аналитические зависимости определения осевой и тангенциальной сил.

3. Разработана методика аналитического определения величины упругого сближения детали и шарика при накатывании, основанная на применении теории Герца-Беляева для контакта упругих тел. Возможность применения указанной теории достигнута путем введения понятия контакта шарика с фиктивным телом, геометрические характеристики которого являются функциями параметров режима накатывания, что впервые позволило рассчитывать упругое сближение детали и шарика в специфических условиях накатывания поверхностей.

4. Для вычисления величины пластического сближения детали и шарика при упрочняюще-калибрующих режимах впервые предложена эмпирическая формула, полученная на основе обобщения экспериментальных исследований в области накатывания деталей общетехнического назначения из конструкционных сталей.

5. Разработана инженерная методика графо-аналитического расчета оптимальных режимов накатывания по исходным данным, имеющимся в чертеже детали: материалу, диаметру и требуемой шероховатости ее поверхности. Методикой предусматривается возможность определения основных конструкторско-технологических показателей для выбора станочного оборудования, расчета технологической оснастки и приспособлений, назначения припуска и поля допуска на обработку детали под накатывание.

6. На основе сравнительных испытаний образцов на усталостную прочность при изгибе с вращением, исследований износостойкости и долговечности, а также по результатам промышленного внедрения установлена целесообразность ППД в качестве предварительной операции перед закаливанием или хромированием деталей. Предложены формулы для коэффициентов оценки эффективности накатывания перед термической обработкой K и сохранения эффекта упрочнения после термической обработки $K_{сохр}$. Кроме того, установ-

лена полная преемственность основного условия и идентичность методик назначения оптимальных режимов как при комбинированной обработке, так и при отдельно проводимом накатывании поверхности детали.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ковалев Р.М., Блохин Л.Г., Торопов И.А. Об оптимальных условиях обкатывания шариком деталей из стали 50Г. – В сб. "Прогрессивная технология чистовой обработки деталей машин". Челябинск, ЧПИ, 1970.

2. Ковалев Р.М., Мазеин П.Г., Подивилов А.В. Исследование микротвердости стали 50Г при обкатывании с последующей закалкой. Материалы XXIII научно-технической конференции. Челябинск, ЧПИ, 1970.

3. Ковалев Р.М., Меньшаков В.М. Повышение износостойкости деталей из стали 50Г обкатыванием шариком с последующей закалкой. – В сб. "Упрочняюще-калибрующие и формообразующие методы обработки деталей". Ростов-на-Дону, РИМСХ, 1970.

4. Ковалев Р.М., Позднякова И.В. Влияние обкатывания перед закалкой на микротвердость стали 50Г. – В сб. "Упрочняюще-калибрующие и формообразующие методы обработки деталей". Ростов-на-Дону, РИМСХ, 1970.

5. Ковалев Р.М., Меньшаков В.М. Влияние обкатывания на усталостную прочность хромированных и износостойкость закаленных деталей. – В сб. "Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностным пластическим деформированием". М., МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1971.

6. Ковалев Р.М. Напряженное состояние цилиндрических деталей при обкатывании шариком. – В сб. "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием". Челябинск, ЧПИ, 1971.

7. Ковалев Р.М., Мазеин П.Г., Блохин Л.Г., Торопов И.А. Влияние режимов обкатывания на микро- и макрогеометрию стальных деталей. – В сб. "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием". Челябинск, ЧПИ, 1971.

8. Ковалев Р.М., Меньшаков В.М., Мазенин П.Г., Блохин Л.Г., Торопов И.А. Влияние поверхностного пластического деформирования и закалки на износостойкость стальных деталей в условиях трения качения. - В сб. "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием". Челябинск, ЧПИ, 1971.

9. Ковалев Р.М., Меньшаков В.М., Раевский А.Н. Площадь контакта и угол вдавливания при накатывании цилиндрических деталей шариком. - В сб. № 114 "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Челябинск, ЧПИ, 1972.

10. Ковалев Р.М., Мазенин П.Г. Влияние операции накатывания шариком цилиндрических деталей на их точность. - В сб. № 114 "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Челябинск, ЧПИ, 1972.

11. Ковалев Р.М., Мазенин П.Г. Некоторые вопросы испытаний стальных деталей на контактную прочность. - В сб. № 114 "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Челябинск, ЧПИ, 1972.

12. Ковалев Р.М., Меньшаков В.М., Мазенин П.Г. Исследование влияния режимов обкатывания стальных деталей перед закалкой на их износостойкость. - В сб. "Вопросы надежности и долговечности машин". Красноярск, КПИ, 1972.

13. Ковалев Р.М., Раевский А.Н. Способ определения износа наружных поверхностей цилиндрических тел. Авт. свид. № 324548 от 1 октября 1971 г., "Бюллетень изобретений", 1972, № 2.

14. Ковалев Р.М., Раевский А.Н. Площадь контакта при обкатывании шариком. - В сб. "Вопросы надежности и прочности железнодорожного пути и подвижного состава". Свердловск, УЭМНИТ, 1973.

Материалы диссертации доложены:

1. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола (1968-74 гг.).

2. На научно-технической конференции вузов Урала по машиностроению. Ижевск, 1970.

3. На Всесоюзной научно-технической конференции "Упрочняюще-калибрующие и формообразующие методы обработки деталей". Ростов-на-Дону, 1970.

4. На Всесоюзном научно-техническом семинаре "Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностным пластическим деформированием". М., МДНТП, 1971.

5. На краевой научно-технической конференции "Вопросы надежности и долговечности машин". Красноярск, 1972.

6. На Юбилейной ХУП научно-технической конференции УЭМИИТа, посвященной 250-летию г.Свердловска. Свердловск, 1973.

7. На научно-техническом семинаре кафедры "Станки и инструмент". ЧПИ, 1974.

8. На объединенном научно-техническом семинаре кафедр "Станки и инструмент", "Технология машиностроения", "Технология металлов". ЧПИ, 1974.

9. На научно-техническом семинаре кафедры "Технология нефтяного и химического машиностроения". Куйбышевский политехнический институт, 1974.