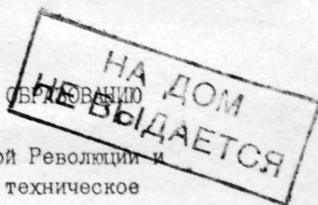


4492184

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ



Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

КУВАЛДИН Юрий Иванович

УДК 621.941 : 621.9.011
: 62-233.1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
УМЕНЬШЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗГИБА
НА ЭТАПЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

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

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Высшем Техническом Училище имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Г.Н.Мельников

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор А.Н.Овсенко ;
кандидат технических наук,
доцент В.В.Комаров

Ведущее предприятие - Московский завод скоростных пре-
цизионных электроприводов

Защита состоится "26" декабря 1988г.
на заседании специализированного совета К 053.15.15
в Московском Высшем Техническом Училище им. Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э.Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверен-
ному адресу.

_____ 1988г.

_____ Р.К.Мещеряков

_____ ем I п.л.

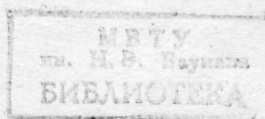
на

11492184

Актуальность проблемы. В материалах XXVII съезда КПСС отмечается, что основные пути решения задач перевооружения всех отраслей народного хозяйства на основе современных достижений науки и техники связаны с внедрением новой прогрессивной технологии, интенсификацией процессов обработки и всемерной экономией материальных ресурсов. Обеспечение высокой надежности и эксплуатационных показателей различных изделий связано с высоким качеством комплектующих деталей.

При обработке нежестких валов, являющихся распространенными деталями во многих отраслях машиностроения, серьезную проблему представляют остаточные деформации изгиба, вынуждающие вводить промежуточные правки, удлиняющие производственный цикл и отрицательно влияющие на работоспособность деталей. Для многих деталей правка нежелательна, а иногда и недопустима. Поэтому снижение остаточных деформаций, возникающих в результате обработки, является насущной задачей, вытекающей из потребностей производства.

Совершенствование технологии механической обработки нежестких валов обычно связывают с возможностью управления упругими деформациями технологической системы за счет применения методов программированного и адаптивного управления. Появление новых высокопроизводительных станков, применение более стойкого режущего инструмента меняют представление о допустимых режимах резания и методах обработки. Вместе с тем, рост режимов и, соответственно, усилий резания ведет в ряде случаев к появлению в общей погрешности обработки новых составляющих, которые исчезающе малы при чисто упругой деформации обрабатываемого вала. В условиях интенсификации режима резания при точении процесс деформирования нежестких валов под действием силы резания носит характер циклического упруго-пластического изгиба, в ходе которого происходит накопление пластических деформаций. В то же время снятие неравномерного припуска приводит к перераспределению имевшихся в заготовке остаточных напряжений и дополнительному короблению вала в пределах упругости. Таким образом, остаточная деформация изгиба обусловлена взаимодействием упругой и пластической составляющих. Такое представление определяет направление борьбы с остаточными деформациями, связанное с взаим-



ной компенсацией их составляющих.

При интенсификации процессов резания остаточные деформации, возникающие на операциях, предшествующих финишной обработке нежестких валов, становятся серьезным препятствием в обеспечении условий высокопроизводительной окончательной обработки. Они оказываются соизмеримыми с погрешностями формы, вызываемыми упругими отжатыми технологической системы. Высокая трудоемкость обработки нежестких валов, практический и научный интерес, который представляет установление закономерностей формирования остаточных деформаций изгиба при их обработке определяют актуальность работы.

Цель работы. Снижение трудоемкости токарной и последующей обработки нежестких валов за счет управления упругой и пластической составляющими остаточной деформации изгиба и интенсификации процесса точения.

Методы исследования. В работе применялись производственные, теоретические и экспериментальные исследования. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики. Теоретические исследования выполнялись на базе основ технологии машиностроения с использованием расчетных и экспериментальных методов определения точности обработки, соответствующих разделов сопротивления материалов и теории пластичности применительно к упруго-пластическому циклическому изгибу нежестких валов. Расчеты выполнялись на ЭВМ ЕС 1022. Основные теоретические выводы подтверждены практически. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием стандартной оснастки и измерительных средств в условиях безлюнетного однорезцового точения резцами с виброустойчивой геометрией. Производственные исследования проводились на базе предприятий машиностроительной и станкоинструментальной промышленности.

Научная новизна. На основе представлений об упруго-пластической природе остаточных деформаций изгиба установлены закономерности их формирования при точении нежестких валов. Разработаны методики расчета и экспериментального определения упругой и пластической составляющих остаточной деформации изгиба при однорезцовом безлюнетном точении. На основе теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости, определяющие влияние технологических и конструктивных факторов на остаточную

деформацию изгиба и ее составляющие. Предложен принцип управления величиной остаточной деформации изгиба, основанный на взаимной компенсации ее составляющих. Установлены экспериментальные зависимости изменения пространственных погрешностей при термической обработке валов.

Практическая ценность. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации, позволяющие управлять остаточными деформациями изгиба при точении нежестких валов на уровнях маршрутной и операционной технологии, что позволяет производить безлюнетную обработку нежестких валов с отношением длины к диаметру $L/d = 20 + 25$ на режимах, обеспечивающих повышение производительности точения до $(15 + 35) \%$ и снижение трудоемкости последующего шлифования до 30% . Показано, что наилучшие результаты с этой точки зрения обеспечивает предварительная термическая обработка, заключающаяся в закалке с высоким отпуском (улучшение). Предложенные методика расчета и программное обеспечение для определения составляющих остаточной деформации изгиба при обработке нежестких валов, теоретические и экспериментальные зависимости могут быть использованы при расчете припусков на механическую обработку.

Реализация работы. Результаты исследований использовались при выполнении научно-исследовательских работ, направленных на снижение остаточного искривления при обработке нежестких деталей на токарных и шлифовальных операциях, и прошли промышленную проверку на Кировском инструментальном заводе "Красный инструментальщик". Годовой экономический эффект от внедрения технологических рекомендаций по построению технологического процесса обработки нежестких деталей составил 2500 руб.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах кафедры "Технология механосборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1985 - 1988 гг.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Прогрессивная технология и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении", Ленинград, 1982 г.; на региональной научно-технической конференции "Интенсификация процессов механической обработки и сборки в машиностроении", Горький, 1988 г.; на областных научно-практических семинарах НТО Машпром Кировской области в 1982 - 1984 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Объем работы. Диссертация изложена на 105 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав с выводами и общих выводов по работе. Содержит 9 таблиц, 89 рисунков, список литературы из 127 наименований, 9 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приведена характеристика ее направленности и научной новизны, сформулирована цель работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы исследования остаточных деформаций при токарной обработке нежестких валов, обоснован выбор объекта и поставлены задачи исследования.

В качестве объекта исследования приняты операции предварительной безлюнетной односторонней токарной обработки гладких и ступенчатых нежестких валов, при которых составляющие исследуемой остаточной деформации изгиба проявляются в "чистом" виде. Материал заготовок - стали 45 и 30ХГСА в состоянии поставки, после улучшения и нормализации. Исследовалась погрешность расположения оси обрабатываемого вала, связанная с его искривлением на операциях токарной обработки, а также предшествующей ей термической обработки в плане ее влияния на формирование пространственных погрешностей валов.

Известные исследования, направленные на повышение точности односторонней безлюнетной обработки нежестких валов и связанные с управлением упругими отжатами элементов технологической системы, оставляют в стороне проблемы, обусловленные возникновением остаточных деформаций изгиба. В работах П.И.Ящерицына, А.М.Дальского, Э.В.Рыжова, В.И.Аверченкова, А.И.Промптова, А.Н.Овсенко и др. установлено, что изолированное изучение отдельных операций технологического процесса не может дать полной картины характеристик качества обработанных деталей. Наибольший эффект борьбы с остаточными деформациями нежестких деталей может дать комбинирование маршрутных и операционных методов управления ими. Однако применительно к обработке нежестких валов эти методы практически не исследованы.

Затруднения, связанные с управлением остаточными деформациями

циями нежестких валов, обусловлены в первую очередь недостаточной изученностью процесса их формирования. Анализ научно-технической литературы показал, что противоречивость взглядов исследователей на причины возникновения остаточных деформаций при обработке нежестких деталей объясняется различием условий обработки, вследствие чего факторы, преобладающие в одних случаях, оказываются незначимыми в других. Основными причинами остаточных прогибов при центровкой односторонней обработки стальных нежестких валов являются перераспределение остаточных напряжений в заготовке при снятии неравномерного припуска и копирование исходной погрешности заготовки, обуславливающие упругую природу остаточных деформаций изгиба. В то же время, в условиях интенсивных режимов резания с учетом крайне низких значений пределов микротекучести σ_s реальных металлов и сплавов изгиб обрабатываемого вала под действием сил резания может носить пластический характер. Пластическая составляющая остаточной деформации изгиба является следствием одностороннего накопления пластических деформаций в условиях изгиба вращающегося вала сосредоточенной силой, перемещающейся вдоль его оси, когда каждое поперечное сечение вала испытывает знакопеременное нагружение с изменяющейся амплитудой, т.е. внешне нестационарный циклический упруго-пластический изгиб. В этих условиях важными оказываются свойства материала заготовки при циклическом нагружении: циклическое упрочнение, разупрочнение, стабильность, которые во многом определяются состоянием материала и видом его термической обработки.

На основании анализа литературных данных, исходя из поставленной цели, были сформулированы основные задачи исследований:

1. Создание математической модели формирования остаточных деформаций изгиба при обработке нежестких валов;
2. Теоретико-экспериментальное исследование влияния технологических факторов на составляющие остаточной деформации изгиба;
3. Исследование маршрутно-операционных методов снижения остаточных деформаций изгиба при обработке нежестких валов;
4. Разработка рекомендаций по уменьшению остаточных деформаций изгиба при точении нежестких валов.

Во второй главе проведен теоретический анализ составляющих

остаточной деформации изгиба при токарной обработке нежестких валов. На основании выводов, сделанных в первой главе, отмечается, что формирование остаточных деформаций в этом случае является результатом одновременного протекания процессов, имеющих различную физическую природу: упругую и пластическую. Разделяются понятия "остаточная деформация" $\bar{f}_{\text{од}}$ и "остаточный прогиб" $\bar{f}$. Первая определяется как $\bar{f}_{\text{од}} = \bar{f}_{\text{с}} + \bar{f}_{\text{нд}}$, где $\bar{f}_{\text{с}}$ - упругая составляющая, обусловленная перераспределением остаточных напряжений заготовки при снятии неравномерного припуска; $\bar{f}_{\text{нд}}$ - пластическая составляющая, связанная с циклическим упруго-пластическим изгибом заготовки под действием силы резания в процессе обработки. Формирование остаточного прогиба при точении нежестких валов может быть представлено как

$$\bar{f} = k_y \bar{f}_0 + \bar{f}_{\text{с}} + \bar{f}_{\text{пр}}, \quad (\text{I})$$

где k_y - коэффициент уменьшения исходной погрешности заготовки. Поэтому связь остаточного прогиба с исходным искривлением идет опосредованно (через составляющие остаточной деформации) и напрямую, через коэффициент k_y , причем последнее зависит в основном от жесткостных характеристик технологической системы. Значения $\bar{f}_0$ и k_y в каждом конкретном случае являются вполне определенными величинами и их исследование в задачи теоретического исследования не входило.

При анализе формирования упругой составляющей $\bar{f}_{\text{с}}$ остаточной деформации изгиба отмечается, что известные методы их расчета неприменимы к обработке нежестких валов, т.к. удаляемый припуск в этом случае изменяется как по длине детали (вследствие упругих отжатий элементов технологической системы), так и в пределах поперечного сечения (по углу поворота заготовки вследствие ее исходного искривления). При расчете составляющей $\bar{f}_{\text{с}}$ приняты следующие допущения, значительно упрощающие математические выкладки: 1) заготовка и обработанная деталь идеально круглые; 2) изгиб обработанной детали происходит в плоскости максимальной неравномерности припуска под действием осевых остаточных напряжений, действовавших в удаленном при снятии припуска поверхностном слое заготовки; 3) осевые остаточные напряжения σ_x сформированы предшествующей термической обработкой; они симметричны, постоянны по длине заготовки и зависят только от ее текущего радиуса ϱ . Эти напряжения аппроксимируются в

зависимости от характера их изменения в пределах удаляемого с припуском поверхностного слоя заготовки (монотонного или немонотонного) соответственно линейной или кусочно-линейной функцией. Осевые остаточные напряжения в цилиндрической заготовке после ее термической обработки определены расчетным методом.

Для определения составляющей $f_{\sigma i}$ остаточной деформации необходимо знать характер распределения по длине обработанного вала дополнительных изгибающих моментов $\Delta M_{\sigma i}$, обусловленных нарушением равновесия внутренних сил при снятии неравномерного в пределах одного оборота заготовки припуска. Величина этого момента определяется уровнем остаточных напряжений в удаляемом припуске, размерами припуска и его неравномерностью, обусловленной фактической величиной эксцентриситета e_i заготовки относительно оси обработанной детали. Величина e_i зависит от жесткости технологической системы и исходного искривления $f_{\sigma i}$ заготовки в i -том сечении и определена по известной методике проф.

В.С.Корсакова. В дальнейшем полагается, что радиус заготовки вала R постоянен по длине, а радиус r_i обработанной детали изменяется по длине вала в соответствии с упругими отжатами технологической системы в процессе обработки. В результате получено, что момент $\Delta M_{\sigma i}$ может быть определен по формуле:

$$\Delta M_{\sigma i} = \frac{e_i r_i^2}{3} \left\{ (2\alpha + q)a + \frac{4br_i}{15q^2} [(-q^2 - 2q^2 + 3)\mathcal{K} + (2q^2 - 7q^2 - 3)\mathcal{E}] \right\} - \frac{e_i R^2}{3} [3\alpha a + 2bR(\alpha - 2\theta_2)], \quad (2)$$

где $q = e_i/r_i$, а a и b - числовые коэффициенты уравнения аппроксимации ($\sigma_x = a + bq$); $\mathcal{K}$ и $\mathcal{E}$ - полные эллиптические интегралы первого и второго рода,

$$\mathcal{K} = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - q^2 \sin^2 \varphi}}, \quad \mathcal{E} = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - q^2 \sin^2 \varphi} d\varphi,$$

$\theta_2 = \arctg(r_i/e_i)$. В случае аппроксимации осевых остаточных напряжений кусочно-линейной функцией, момент $\Delta M_{\sigma i}$ определяется как

$$\Delta M_{\sigma i} = \frac{e_i}{3} \sum_{j=1}^{n_a} \left[p_j^2 \left\{ (2\alpha + q)a_j + \frac{4b_j p_j}{15q^2} [(-q^2 - 2q^2 + 3)\mathcal{K} + (2q^2 - 7q^2 - 3)\mathcal{E}] \right\} - g_j^2 \cdot [3\alpha a_j + 2(\alpha - 2\theta_2)b_j p_{j-1}] \right], \quad (3)$$

где n_a - количество участков аппроксимаций; a_j и b_j - числовые коэффициенты уравнения аппроксимации для j -го участка с границами p_{j-1} и p_j .

Зная характер изменения моментов $\Delta M_{\sigma i}$ по длине обработанного вала, можем определить упругие перемещения при изгибе, используя известные методы сопротивления материалов. В результате

$$f_{\sigma} = \frac{1}{EI} \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{\Delta M_{\sigma i} - \Delta M_{\sigma i+1}}{2} \left\{ H[x, (i-1)S_0] \left[\frac{x - (i-1)S_0}{S_0} \right]^2 - \left[\frac{L - (i-1)S_0}{S_0} \right]^2 \frac{x}{L} \right\} \right], \quad (4)$$

где EI - жесткость при изгибе; $n_1 = L/S_0$, L - длина вала, S_0 - подача на оборот заготовки; $H[x, (i-1)S_0]$ - функция Хевисайда;

$\Delta M_{\sigma 0} \equiv 0$. Расчет составляющей f_{σ} остаточной деформации изгиба реализован в виде программы, составленной на языке ФОРТРАН.

Анализ полученных зависимостей (2) - (4) позволил выявить два пути управления составляющей f_{σ} остаточной деформации. Первый - через маршрутную технологию формированием в поверхностном слое заготовки технологических остаточных напряжений, обеспечивающих минимально возможные при данных условиях величины f_{σ} . Благоприятными в этом смысле являются остаточные напряжения сжатия, сформированные в поверхностном слое вала, например, улучшением. Наиболее благоприятными при этом оказываются эпюры, в которых переход сжимающих остаточных напряжений на поверхности заготовки в растягивающие напряжения в поверхностном слое происходит в пределах удаляемого при точении припуска. Второй путь - управление составляющей f_{σ} на уровне операции, включающее правильный выбор положения технологических базовых поверхностей, учитывающий фактическое искривление заготовки и жесткость технологической системы, а также назначение рациональных режимов резания (глубины резания t , подачи S_0).

Для определения величины пластической составляющей $f_{\text{пл}}$ остаточной деформации изгиба при безлунетном точении нежестких валов необходимо найти накопленную пластическую деформацию в поверхностных слоях вала, обусловленную циклическим упруго-пластическим изгибом в процессе обработки. На основании литературного анализа представляется возможным произвести оценку накопленной пластической деформации в предположении стационарности процесса деформирования вала в среднем, наименее жестком его сечении. При этом для оценки верхнего предела накопленной пластической деформации, который будет определять максимальные значения пластической составляющей остаточной деформации изгиба, расчет проведен для амплитуды нагружения, соответствующей максимальному напряжению в поперечном сечении вала при его изгибе, с числом циклов деформирования, соответствующим протяженности упруго-пластического участка по длине обрабатываемого вала. Расчет пластической составляющей остаточной деформации изгиба производил-

ся по формуле $f_{\text{пл}} = f_p^{(0)} \cdot A(k_s)$, где $f_p^{(0)}$ - прогиб, обусловленный пластической деформацией в исходном нагружении; $A(k_s)$ - множитель, зависящий от длительности упруго-пластического деформирования (характеризуемой количеством полциклов k_s деформирования) и циклических свойств материала и определяемый по методике А.П.Гусенкова.

Анализ полученных зависимостей показал, что управление величиной пластической составляющей остаточной деформации изгиба возможно через воздействие на структуру обрабатываемого вала (что определяет его циклические свойства и предел микротекучести) и путем изменения режима обработки. Структуру материала заготовки можно формировать на предшествующих операциях технологического процесса как посредством термической обработки, так и механическим воздействием (например, пластическое деформирование растяжением, кручением и т.п.). Параметры режима резания влияют как на силовые характеристики процесса точения (t , S_0), так и на количество циклов упруго-пластического деформирования (S_0).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований остаточных деформаций на стадии предварительной обработки нежестких валов.

Необходимость экспериментального исследования изменения пространственных погрешностей нежестких валов при термической обработке обусловлена влиянием исходного искривления заготовки на величину остаточных прогибов, причем именно термическая обработка в наибольшей степени изменяет искривление нежестких валов. Применительно к пространственным погрешностям валов термическая обработка - не "барьер", а обычная операция, которая может привести к увеличению или уменьшению указанных погрешностей. Поэтому представляется правомерным применение методов исследования, основанных на технологическом наследовании. Установлено, что между биением вала до и после термической обработки имеет место связь, которую можно оценить по величине коэффициента передачи биения k_s , имеющего вероятностную природу, причем $k_s = \delta_{\text{max}}^{\text{зар}} / \delta_{\text{max}}$, где $\delta_{\text{max}}^{\text{зар}}$ - максимальное биение заготовки до термической обработки, δ_{max} - то же после термической обработки. Исследования выполняли на предварительной зацентро-

ванных заготовках нежестких валов из сталей 30ХГСА (улучшение, HRC₂ 38...42) и 45 (улучшение, HRC₂ 23...28; нормализация, HB 180...200; термоциклическая обработка, HB 160...180). При термической обработке валы располагали вертикально. После термической обработки базовые поверхности центровых отверстий восстанавливались. Диаметр заготовок валов $d = (8 + 36)$ мм, длина $L = (120 + 400)$ мм. В ходе предварительных экспериментов на выборках объемом $N = 30 + 50$ шт. было установлено, что распределение максимального биения валов до термической обработки, после нормализации и ТЦО соответствует закону Релея, а после закалки — закону Гаусса. Термическая обработка типа отпуска не изменяет закона распределения максимального биения валов. Экспериментальное распределение коэффициентов передачи биения k_s согласуется с законом Вейбулла при параметре формы $\epsilon = 2,0$ и параметре сдвига $c = \min\{k_{s,i}\}$. Установлено, что имевшиеся в заготовке остаточные напряжения при термической обработке типа нормализации и закалки не влияют на величину пространственных погрешностей валов, которые определяются главным образом видом термической обработки, материалом заготовок, их исходным искривлением и размерами.

При проведении основного эксперимента для каждого вида термической обработки был реализован ПФЭ 2^2 (варьируемые факторы L, d). Полученные зависимости вида $y = b_0 L^{b_1} d^{b_2}$, позволяющие определить значения полей рассеяния биений Δ_p , средних значений биений $\bar{\delta}$, минимальных $k_s^{\min}$, средних k_s и максимальных $k_s^{\max}$ значений коэффициентов передачи биения при термической обработке валов.

Экспериментальные исследования остаточных деформаций при безлунетном точении нежестких валов проводились на станках моделей 16К20 и 85 ТС-I. Обработку вели в центрах с поводком, задний центр вращающийся стандартной конструкции. Предварительные эксперименты показали, что в исследуемом диапазоне режимов резания: $t = (0,15 + 1,0)$ мм, $S_0 = (0,25 + 0,35)$ мм/об, $v = (0,5 + 1,6)$ м/с при диаметре валов $d = (12 + 16)$ мм вплоть до $L/d = 20$, а для валов после улучшения при $t = (0,15 + 0,8)$ мм — до $L/d = 25$ имеет место удовлетворительная устойчивость процесса точения без лунета резцами с виброустойчивой геометрией. При выполнении эксперимента на валах выполнялась шлифованная контрольная

шейка в среднем по длине вала сечении, и при последующем точении резец не касался ее эталонной поверхности. Экспериментальная проверка и теоретический расчет показали, что влияние шейки на величину упругой и пластической составляющих остаточной деформации как правило незначимо (за исключением валов с $L = 300$ мм и $d = 12$ мм, протачиваемых при $t = 1$ мм, на которых при дальнейшем исследовании контрольная шейка не выполнялась). Значения коэффициента уменьшения исходной погрешности заготовки k_y определяли расчетным методом.

Для экспериментального определения составляющих остаточной деформации изгиба подготавливались две партии заготовок одинаковых типоразмеров. Каждая партия проходила соответствующие операции, предшествующие токарной обработке (заготовительные, термические). Далее в одной из партий снимали остаточные напряжения посредством высокого (стабилизирующего) отпуска. При точении таких заготовок перераспределение напряжений отсутствует и модель (I) принимает вид $\bar{f} = \bar{f}'_0 + \bar{f}_{nd}$, где $\bar{f}'_0 = k_y \bar{f}_0$. Зная фазовый сдвиг между направлением исходного искривления $\bar{f}_0$ заготовки и остаточным прогибом $\bar{f}$ после обработки (определяемых экспериментально измерением величины и направления биения контрольной шейки), находили составляющую $\bar{f}_{nd}$ остаточной деформации изгиба.

При точении заготовок с остаточными напряжениями формирование остаточного прогиба происходит по схеме (I). Вполне естественным представляется допущение о независимости величины составляющей $\bar{f}_{nd}$ от остаточных напряжений в заготовке. При определении величины составляющей $\bar{f}_0$ принимается, что ее вектор лежит в плоскости максимального перепада припуска, а направление зависит от знака остаточных напряжений в поверхностном слое, удаляемом с припуском. При снятии слоев с растягивающими остаточными напряжениями составляющая $\bar{f}_0$ направлена в сторону поверхности, с которой снимается припуск, а при снятии слоев со сжимающими остаточными напряжениями — в противоположную.

Величину и направление остаточных прогибов определяли через измерение радиального биения с использованием индикаторного приспособления с установленной в нем головкой ИМИГ. Биение в требуемом сечении измеряли при ручном повороте вала на центрах станка. Направление биения отмечалось риской на контрольной шейке или торце заготовки. Угол между риской и началом отсчета измеряли как угол поворота шпинделя станка по делительному лимбу.

Предельная относительная погрешность определения косвенно измеряемых величин составляющих остаточной деформации не превышает $(5 + 14) \%$ для $f_{нд}$ и $(15 + 25) \%$ для f_c .

Установленное на основании теоретического анализа многообразие технологических факторов, влияющих на остаточную деформацию и ее составляющие, приводит к необходимости планирования эксперимента. Экспериментально подтверждено, что причинами остаточных деформаций изгиба при безлунетном точении нежестких валов являются составляющие, связанные с перераспределением остаточных напряжений и упруго-пластическим деформированием вала под действием силы резания. Эксперимент подтвердил выводы теоретического исследования о значимости и характере влияния технологических и конструктивных факторов на остаточные деформации и их составляющие. Расхождение результатов эксперимента с расчетными не превышает 20% для упругой составляющей остаточной деформации изгиба и $(25 + 30) \%$ для пластической, что можно признать вполне удовлетворительным, учитывая особенности обработки нежестких валов.

В ходе первого эксперимента, выполненного по плану ПФЭ 2^3 на валах из стали 45, исследовалось влияние на остаточную деформацию изгиба размеров валов (L, d) и глубины резания t , влияющей на момент инерции поперечного сечения обрабатываемого вала и в известной мере определяющей жесткость вала в процессе точения. В другом эксперименте (план ДФЭ 2^{5-2}) в качестве независимых переменных исследовались длина L (диаметр d) заготовки, ее исходное искривление f_0 , глубина резания t , скорость резания v и подача S_0 . Этот эксперимент выполнялся на заготовках из сталей 45 и 30ХГСА, при этом особое внимание уделялось величине исходного искривления подготовленных заготовок, отклонение которого от заданного не превышало $(0,03 + 0,05)$ мм. Для получения требуемого искривления часть заготовок подвергали правке поперечным изгибом. Для каждого вида термической обработки половину заготовок подвергали высокому (стабилизирующему) отпуску для снятия остаточных напряжений, вносимых предшествующими технологическими операциями (в том числе все заготовки, проходившие правку). В каждой узловой точке плана ставилось по 5 параллельных опытов. Получены эмпирические зависимости для определения остаточной деформации и ее составляющих при обработке нежестких валов. При этом соотношения, полученные для составляющей $f_{нд}$,

могут быть использованы при прогнозировании остаточных деформаций в случае безлунетного точения нежестких валов, прошедших предварительное снятие остаточных напряжений; зависимости для составляющей f_{ϵ} можно использовать в случае обработки нежестких валов с дополнительными опорами, когда проявление пластической составляющей подавляется за счет схемы обработки.

В ходе экспериментов установлено, что при безлунетном точении нежестких валов имеет место взаимная компенсация составляющих остаточной деформации изгиба, поэтому снятие остаточных напряжений в заготовках валов перед точением может привести к увеличению результирующей остаточной деформации.

В четвертой главе на основе результатов теоретико-экспериментального исследования показаны конкретные пути снижения остаточных деформаций изгиба на стадии разработки маршрутной технологии и уровне операций токарной обработки нежестких валов. Известные технологические методы снижения остаточной деформации изгиба и уменьшения ее составляющих могут быть дополнены методами взаимной компенсации составляющих, основанными на выравнивании (не всегда в сторону уменьшения) их величины, что расширяет возможности интенсификации процесса обработки.

Управление остаточными деформациями на уровне маршрутной технологии связано с формированием заданной структуры и свойств материала заготовки, а также остаточных напряжений в ее поверхностных слоях, что достигается выбором соответствующего вида термической обработки или механическим наклепом заготовки. Весьма эффективным средством является предварительная термическая обработка, которая влияет на соотношение составляющих остаточной деформации. Установлено, что доля пластической составляющей в общем балансе остаточной деформации изгиба при точении нежестких валов из материала в состоянии поставки наименьшая, $(6 + 28)\%$, а для заготовок после нормализации - наибольшая, $(50 + 95)\%$. Для заготовок после улучшения эта величина в 50% случаев укладывается в диапазон $(40 + 60)\%$, что благоприятствует взаимной компенсации составляющих. В этой связи для снижения остаточных деформаций изгиба при точении нежестких валов желательна термическая обработка типа улучшения, что позволяет также расширить диапазон устойчивой обработки нежестких валов (до $L/d = 20 + 25$), повысив производительность токарной обработки на $(15 + 35)\%$.

Другим методом воздействия на структуру материала и остаточные напряжения в нем является механический наклеп. В работе исследовано влияние предварительного упруго-пластического растяжения валов из стали 30ХГСА ($L = 120$ мм, $d = 8$ мм). В первой партии была реализована технологическая последовательность "заготовка - растяжение - точение", во второй - "заготовка - растяжение - термическая обработка (улучшение) - точение". Предварительное растяжение производили на машине УММ-5, токарную обработку вели в центрах без люнета. Режим точения заготовок партии 1: $v = 0,5$ м/с ($n_{ш} = 1250$ об/мин), $t = 0,5$ мм, $S_o = 0,22$ мм/об; партии 2: $v = 0,42$ м/с ($n_{ш} = 1000$ об/мин), $t = 0,6$ мм, $S_o = 0,25$ мм/об. Установлено, что при точении нежестких валов партии 1 остаточное искривление валов с предварительной остаточной деформацией растяжения $\epsilon_o = (0,1 + 0,2)$ % уменьшается до 3-х раз в сравнении с нерастянутыми заготовками. При токарной обработке валов партии 2 имеет место снижение остаточных прогибов, а также погрешности формы в продольном сечении до 30 %. Выполненные исследования показали, что предварительное растяжение нежестких валов с их последующим улучшением позволяет повысить производительность токарных операций на $(20 + 30)\%$ при снижении трудоемкости последующего шлифования до 30 %.

Управление остаточными деформациями изгиба при проектировании токарных операций включает обработку нежестких валов с преднамеренным смещением технологических базовых поверхностей и назначение рациональных режимов резания. Экспериментальное исследование, выполненное на валах из стали 45 в состоянии поставки ($L = 320$ мм, $d = 16$ мм) показало, что зацентровка валов со смещением осей центровых отверстий относительно осей концевых сечений в направлении максимального искривления нежесткого вала позволяет почти вдвое уменьшить значения максимального остаточного прогиба в сравнении с обработкой валов без смещения осей центровых отверстий. Это позволяет снизить трудоемкость последующего шлифования за счет уменьшения припуска.

Степень воздействия параметров режима резания зависит от вида термической обработки и состояния материала обрабатываемого вала. Возрастание скорости резания при обработке закаленных сталей приводит к значительному (до 1,4 + 2,5 раз) снижению остаточных деформаций, а увеличение подачи - к их снижению

до 1,5 раз. Поэтому технологические методы воздействия на процесс формирования остаточных деформаций состоят в назначении максимально возможных подачи (по условиям шероховатости обработанной поверхности) и скорости резания (по условиям стойкости режущего инструмента), а также глубины резания в соответствии с исходным искривлением заготовок нежестких валов.

Экономический эффект от внедрения проведенных исследований обусловлен повышением производительности обработки на токарных операциях без применения специальной технологической оснастки за счет интенсификации режимов резания после предварительного упруго-пластического растяжения и термической обработки заготовок нежестких валов, а также снижением трудоемкости последующего шлифования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Подтверждено, что при одностороннем безлюнетном точении нежестких валов имеет место пластическая составляющая остаточной деформации изгиба.

2. На основе представления об упруго-пластической природе остаточной деформации изгиба установлены закономерности ее формирования. Основными причинами остаточных деформаций изгиба являются перераспределение имевшихся в заготовке остаточных напряжений при снятии неравномерного припуска и циклический упруго-пластический изгиб под действием силы резания в процессе обработки нежестких валов.

3. Управление остаточными деформациями изгиба при односторонней безлюнетной обработке нежестких валов может осуществляться на уровнях разработки маршрутной и операционной технологии путем взаимной компенсации составляющих остаточной деформации через:

- предварительную термическую обработку, предпочтительным видом которой является улучшение, что позволяет производить безлюнетное точение валов с отношением длины к диаметру $20 + 25$ на режимах, обеспечивающих повышение производительности на $(15 + 35) \%$;
- предварительное упруго-пластическое растяжение заготовок нежестких валов, позволяющее повысить производительность безлюнетного точения на $(20 + 30) \%$ при снижении трудоемкости последующего шлифования до 30% ;
- преднамеренное смещение осей технологических базовых поверхностей нежестких валов в направлении исходного искривления, что

позволяет снизить трудоемкость последующего шлифования на (10+20) %;

- назначение рациональных параметров режима резания, позволяющих повысить производительность обработки на (20 + 25) %.

4. Экономическая эффективность выполненной работы обусловлена ростом производительности безлунетного точения нежестких валов и снижением трудоемкости последующего шлифования. Результаты работы внедрены на Кировском инструментальном заводе "Красный инструментальщик" имени 60-летия Союза ССР. Экономический эффект от внедрения результатов работы составил 2500 руб. в год.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Васильевых Л.А., Кувалдин Ю.И. Исследование коробления деталей малой жесткости при традиционной термообработке и при ТЦО //Термоциклическая обработка металлических материалов: Материалы к конференции. -Л.: Наука, 1980. - С.26-28.
2. Васильевых Л.А., Кувалдин Ю.И., Тиунов С.Н. Использование ТЦО для улучшения обрабатываемости деталей малой жесткости //Термоциклическая обработка металлических изделий: Материалы к конференции. -Л.: Наука, 1982. - С.75-77.
3. Васильевых Л.А., Кувалдин Ю.И., Тиунов С.Н. Проблема управления остаточными деформациями изгиба деталей малой жесткости при точении //Прогрессивная технология и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции. -Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. - С.68-70.
4. Кувалдин Ю.И. Формирование остаточных деформаций изгиба при точении нежестких валов //Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - №6. - С.129-131.
5. Кувалдин Ю.И., Васильевых Л.А. Изменение пространственных погрешностей валов при термической обработке //Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - №9. - С.111-115.
6. Кувалдин Ю.И., Бурцев В.М. Определение остаточных прогибов, вызванных неравномерностью припуска при обработке нежестких валов //Известия ВУЗов, Машиностроение. -1988.- №5. - С.148-154.
7. А.с. 649511, СССР, МКИ В 23 В 31/10. Токарный патрон /Л.А.Васильевых, Ю.И.Кувалдин (СССР). - Оpubл. 28.02.79, Бюл. №8. - 2с.

Кувалдин

