

Б
А 39

Рижский политехнический институт

На правах рукописи

Я. П. КОЧЕТКОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ
УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ
ВНУТРЕННЕМ ПРОТЯГИВАНИИ**

164 - Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рига - 1969

РИЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Я. П. КОЧЕТКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ
ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ПРОТЯГИВАНИИ

164 - Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рига. 1969

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения производительности труда в машиностроении существующие процессы обработки заменяются более прогрессивными. С точки зрения увеличения производительности, точности и долговечности обрабатываемых деталей протягивание имеет большие перспективы. Во многих случаях на заводах внедрение протягивания задерживается из-за недостаточной изученности погрешностей обусловленных упругими деформациями. Эти погрешности меняются в зависимости от режима обработки, жесткости детали и физико-механических свойств обрабатываемого материала и конструкции протяжек.

В настоящее время указанные вопросы при протягивании недостаточно изучены; формулы, описывающие упруго-напряженное состояние, не проверены экспериментально. Не изучено распространение пластических деформаций и степень упрочнения материала; не ясно влияние динамики сил и воздействие их на точность. Также отсутствуют приборы, используя которые можно было бы с достаточной точностью определить изменение динамических радиальных деформаций.

В работе, состоящей из 6 глав, поставлены следующие задачи:

1/ разработать аппаратуру и создать методику записи деформаций стенок детали;

2/ при помощи специально разработанных приборов /экспериментальным путём/ исследовать общую картину радиальных деформаций в зависимости от толщины стенок, длины детали, физико-механических свойств материала и скорости протягивания;

3/ проверить и уточнить существующие формулы для расчёта радиальных деформаций;

4/ исследовать особенности деформации детали и влияние сил трения на радиальные деформации;

5/ определить глубину распространения зоны пластических деформаций и установить их связь с физико-механическими свойствами материала;

6/ изучить влияние радиальных деформаций на изменение фактической толщины срезаемой стружки в зависимости от относительной толщины стенок, подъёма на зуб и физико-механических свойств материала.

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О РОЛИ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ПРОТЯГИВАНИИ

В первой главе рассмотрены опубликованные в литературе данные о роли радиальных деформаций при внутреннем протягивании. Основное внимание уделялось влиянию их на точность обработки. Проанализированы результаты, полученные в работах А.В.Щеголева по влиянию симметричного кольцевого давления радиальными силами на поперечное растяжение стенки заготовок. Большое внимание уделялось таким работам, где описываются погрешности формы отверстия, полученные после обработки протягиванием /В.П.Сажин, В.А.Сергиенко, К.П.Незабытовский и др./.

Анализируется ряд работ с целью выбора метода для определения радиальных деформаций расчетным путем. Рассматриваются работы Г.И.Грановского и Л.А.Михеевой с точки зрения возможности использования существующих формул для определения радиальных деформаций. Значительное место отведено анализу работ Л.Р.Апина, Ю.Г.Проскуракова. В этих работах представлена методика по определению радиальных деформаций расчетным путем. В результате обзора литературных данных установлено следующее: в настоящее время отсутствует исследование радиальных деформаций непосредственно во время протягивания. Поэтому появилась необходимость дать более исчерпывающие опытные методы и результаты исследования упруго-пластических деформаций при внутреннем протягивании.

Глава 2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ

Здесь представлен анализ возможности применения существующих приборов для исследования радиальных деформаций. Предложен специальный прибор для исследования радиальных деформаций / на него получено авторское свидетельство / и представлена специальная методика исследования.

Принцип работы прибора

Конструкция прибора исполнена при соблюдении целого ряда требований / основными из них являются: прибор должен быть

жестко закреплен с измеряемой деталью и вместе с ней перемещаться в пространстве; измерительные наконечники прибора должны быть строго координированы относительно исследуемой поверхности; точность регистрации деформации должна быть до 1 мк и иметь широкий диапазон измерений радиальных деформаций от 1 до 100 мк. Общий вид прибора и запись динамических радиальных деформаций представлена на рис. I, как видно из него, корпус прибора непосредственно связан с исследуемой деталью с помощью щупов 2, которые внедрены в материал обрабатываемой детали. Поскольку острия щупов прибора помещены на одном диаметре, они вместе с корпусом прибора будут воспринимать радиальные деформации в этих точках. Радиальное перемещение остриев через корпус прибора передается на пластинку с активным тензодатчиком 3, который передает импульс деформации пластинки на усилитель 4, магазин сопротивлений и в конечном

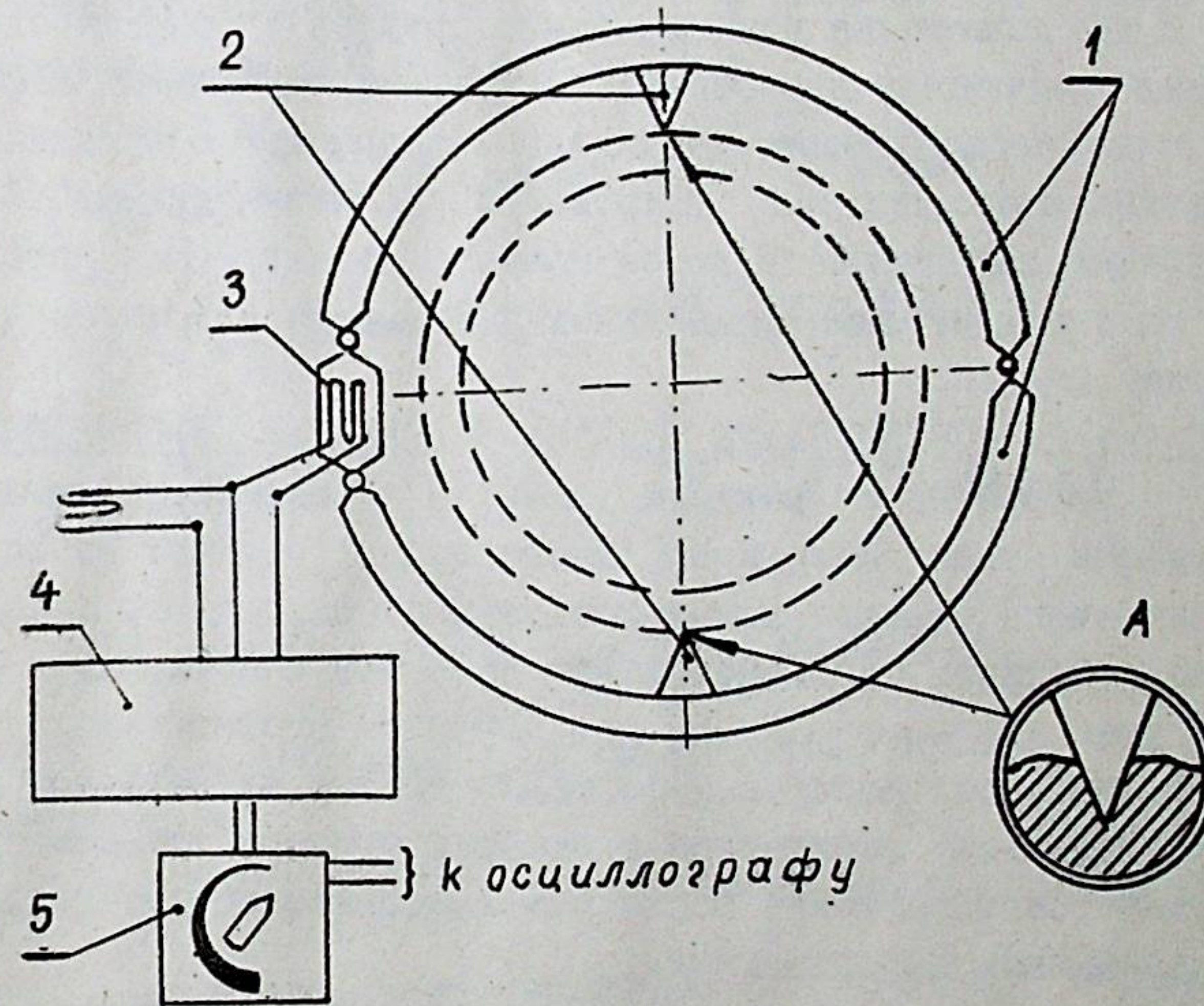


Рис. I. Принципиальная схема исследования радиальных деформаций. 1-быстросъемная скоба /корпус приспособления/, 2-щупы, 3-активный тензодатчик, 4-усилитель, 5-магазин сопротивлений, А-место внедрения щупа в материал детали при установке прибора на нее.

итоге на шлейф осциллографа. у прибора предусмотрены также тарировочное устройство, устройство для внедрения острия прибора в исследуемую деталь и устройство для точной установки прибора на обрабатываемой детали.

Методика исследования радиальных деформаций

При исследовании радиальных деформаций для исключения их искажений /от неточного положения протяжки, неправильной установки прибора, влияния сил трения на опорном конце заготовок, изменение жесткости детали по длине/ при проведении экспериментов соблюдена особая методика и применены дополнительные устройства, которые при обычном протягивании отсутствуют. Установку прибора у всех исследуемых партий деталей в строго одинаковом и точном положении обеспечило специальное устройство, которое перед экспериментом одевалось на деталь. Влияние трения и изменение жесткости детали по длине исключалось путём помещения измерительных органов у "бесконечно длинных" заготовок в середине. Искажение радиальных деформаций от перекоса протяжек устранилось с помощью специального поддерживающего протяжку устройства. Величина динамических радиальных деформаций в любом моменте протягивания определялась по осциллограмме радиальных деформаций и тарировочным отметкам на ней.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

В первой части раздела решается определение фактической деформации стенки детали от одного зуба протяжки. На основе приближённого решения для толстостенных цилиндров, находящихся под действием осесимметричной нагрузки и формул для определения радиального усилия P_y при наружном протягивании, получены формулы для расчёта деформации детали на наружной поверхности. Используя записанные с помощью прибора осциллограммы, проведено сопоставление последних с теоретически рассчитанными радиальными деформациями.

Во второй части описывается исследование суммарных радиальных деформаций. Для расшифровки последних введено понятие типовой осциллограммы. В результате получены зависимости радиальных деформаций от скорости протягивания, материала и подъёма на зуб.

Деформация стенки детали от одного зуба протяжки

Для получения всестороннего представления о радиальных деформациях и для сопоставления теоретических расчётов с опытными, проведены аналитические расчёты радиальных деформаций втулкообразных деталей при внутреннем протягивании. Для решения задачи теоретического определения упругой деформации стенки втулок использовано приближенное решение для толстостенных цилиндров, находящихся под действием переменной по длине осесимметричной нагрузки, предложенное С.В.Бояршиновым / и Л.Р.Апиным для внутренней стенки втулок при протягивании/. При действии постоянного по длине лезвия зуба-давления в процессе протягивания радиальное смещение запишется в виде:

$$u = A(\xi) \rho + B(\xi) \frac{1}{\rho} \quad /1/$$

Для наружного диаметра $r_1 = r_2$ и $\rho = 1$ написанная выше формула принимает вид $u = A(\xi) + B(\xi)$, где

$$A_2 = -\frac{P_y}{2E} \left[\alpha C_2 (e^{-\alpha \xi} \cdot \cos \alpha \xi + e^{-\alpha \xi} \cdot \sin \alpha \xi) + \beta C_6 (e^{-\beta \xi} \cdot \cos \beta \xi + e^{-\beta \xi} \cdot \sin \beta \xi) \right];$$

$$B_2 = \frac{P_y}{2E} \left[m \alpha C_2 (e^{-\alpha \xi} \cdot \cos \alpha \xi + e^{-\alpha \xi} \cdot \sin \alpha \xi) - n \beta C_6 (e^{-\beta \xi} \cdot \cos \beta \xi + e^{-\beta \xi} \cdot \sin \beta \xi) \right]; \quad /2/$$

если $\xi = 0$ или деформация определяется в сечении, где приложена нагрузка, то

$$A_0 = -\frac{P_y}{2E} (\alpha C_2 + \beta C_6); \quad B_0 = \frac{P_y}{2E} (\alpha m C_2 - \beta n C_6), \quad /3/$$

где E - модуль упругости, величины α , β , m и n определяются из графиков С.В.Бояршинова:

$$C_2 = k^2 \frac{n(1-\mu) - (1+\mu)}{(1-k^2) \cdot (m+n)}; \quad C_6 = k^2 \frac{m(1-\mu) + (1+\mu)}{(1-k^2) \cdot (m+n)} \quad /4/$$

Таблица I.

$k = \frac{d_1}{d_2}$	Величина $q = \frac{2u_{2(\xi)} \cdot E}{P_y}$								
	$\xi = 0$	$\xi = 0,3$	$\xi = 0,5$	$\xi = 0,7$	$\xi = 0,8$	$\xi = 1,0$	$\xi = 1,3$	$\xi = 1,5$	$\xi = 2,0$
0,8	+9,51	+6,13	+2,9	+0,69	+0,31	-0,39	-0,34	-0,17	+0,04
0,7	+4,21	+3,38	+1,84	+0,74	+0,37	-0,15	-0,15	-0,16	+0,03
0,5	+1,00	+1,13	+0,76	+0,40	+0,26	-0,07	-0,05	-0,06	+0,03
0,4	+0,92	+0,68	+0,40	+0,27	+0,18	-0,03	-0,02	-0,04	+0,02

Результаты расчётов по формулам / I-4/ представлены в таблице I. По данным таблицы видно, что величина $\frac{2u_2 E}{P_y}$ меняет знак с положительного на отрицательный. Первая половина положительной волны затухает при $\xi = 0,8$. Отрицательная волна затухает при $\xi = 1,5$. Для расчёта радиального усилия на 1 мм зуба лезвия протяжки использована формула, предложенная Г.И. Грановским

$$P_y = C_6 a^y + C_7 v + C_8 \gamma - C_9 \alpha, \quad /5/$$

где a - толщина слоя в мм, срезаемого одним зубом протяжки,
 v - скорость резания в м/мин.,
 γ - передний угол в градусах,
 α - задний угол в градусах,
 C_6, C_7, C_8, C_9 - коэффициенты, взятые из таблиц,
 y - показатель степени.

При записи осциллограммы деформации от одного зуба протяжки была поставлена цель - исследовать изменения радиальных деформаций наружной поверхности "бесконечно длинных" заготовок с различной толщиной стенок. Такие осциллограммы, наложенные одна на другую, представлены на рис.2. Как видно, с увеличением "к" / т.е. с увеличением толщины стенок / радиальные деформации увеличиваются. Характерным является также то, что радиальные деформации с уменьшением толщины стенок становятся более нестабильными. В результате обработки экспериментальных данных и теоретических расчётов радиальных деформаций получены величины, сведенные в таблицы: таблица 2 - опытные данные, полученные непосредственно из осциллограмм радиальных деформаций, таблица 3 - данные аналитического расчёта.

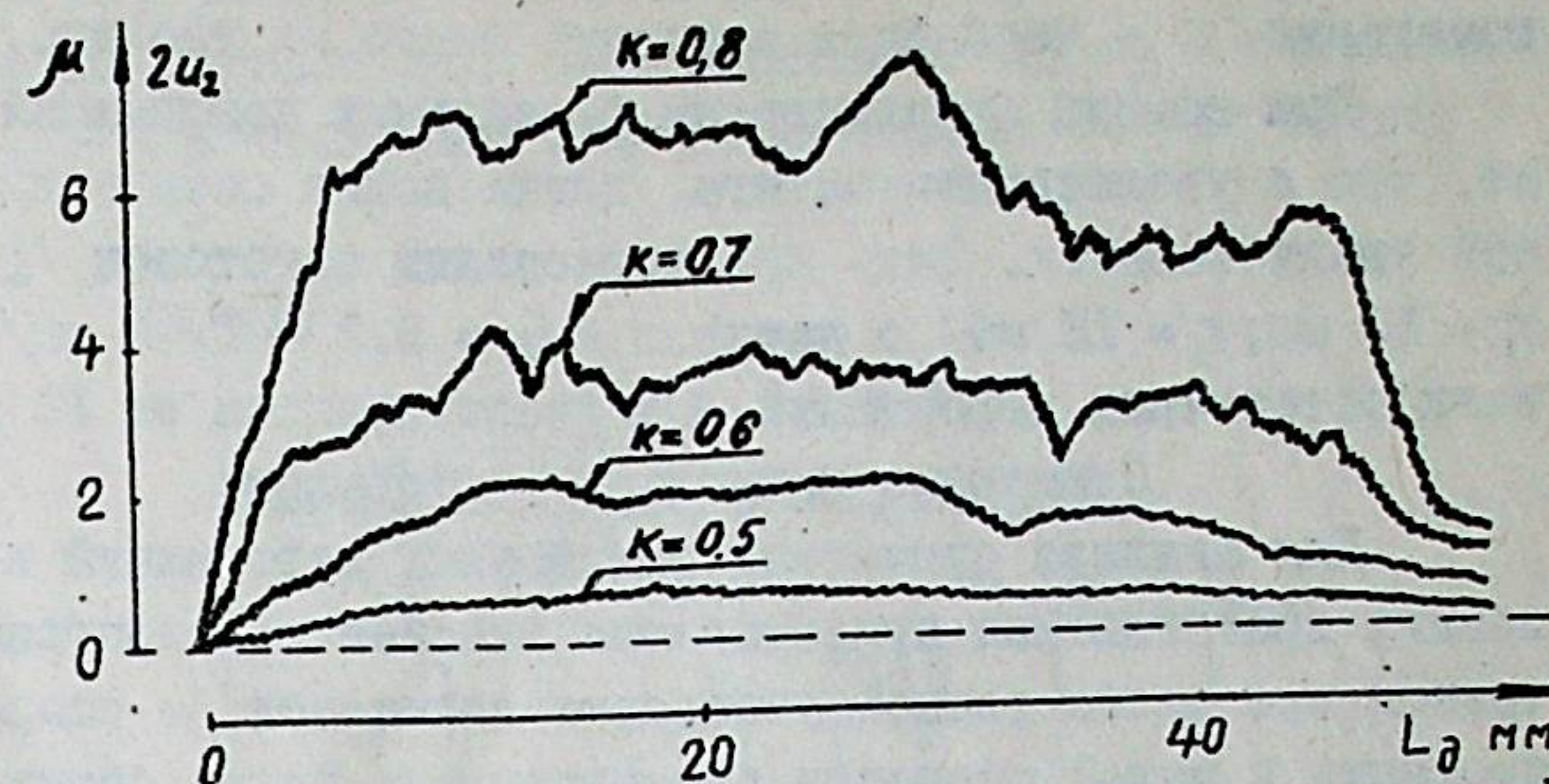


Рис.2. Изменение величин радиальных деформаций в зависимости от коэффициента "к", полученного опытным путём. k - отношение внутреннего и наружного радиусов; $d_1 = 33,3$ мм.

Таблица 2.

Экспериментальные значения деформаций для протяжки $\phi 34$ мм

$k = \frac{d_1}{d_2}$	0,4	0,59	0,68	0,73	0,8
$2u_r$	0,95	1,55	2,10	2,86	2,96
$2u_{2max}$	0,9	1,58	4,10	6,90	7,20

Таблица 3.

Теоретически подсчитанные значения деформации для протяжки $\phi 34$ мм

$k = \frac{d_1}{d_2}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$2u_2$	0,22	0,45	0,9	1,9	4,3

Также проведено сравнение волн радиальных деформаций, построенных по теоретическому расчёту с практически заснятой осциллограммой при резании протяжкой с одним зубом. Для этого численные величины $2u_{2(\xi)}$ в отдельных точках волны упругих радиальных деформаций на расстоянии ξ / где ξ безразмерные координаты от места лезвия протяжки, т.е. от приложения радиального усилия P_y / рассчитаны по следующему соотношению:

$$2u_{2(\xi)} = \frac{P_y \cdot q}{E}, \quad /6/$$

где $u_{2(\xi)}$ - радиальная деформация на расстоянии ξ от места измерения, q - численное значение взято из таблицы.

При помощи осциллограмм радиальных деформаций установлено, что с увеличением натяга, длина волны остаточных деформаций увеличивается. Так, при дорновании заготовок $L = 40$ мм; $r_1 = 13$ мм; $r_2 = 18$ мм / с натягом $\delta r = 0,2 - 1,44$ мм / длина волн остаточных деформаций ξr_2 увеличивается от 12 до 22 мм.

Суммарные радиальные деформации

Для анализа суммарных радиальных деформаций в любых условиях протягивания представлена типовая осциллограмма, полученная при особо точной установке заготовок, с сопровождением протяжки и малой скорости протягивания. Такая осциллограмма /при $L = 50$ мм; $\kappa = 0,48$; $t = 9$ мм; $v = 0,286$ м/мин./ представлена на рис.3. Осциллограмму можно разделить на следующие части: I - тарировка, II - участок врезания /число одновременно режущих зубьев возрастает/, III - основное протягивание, IV - участок выхода зубьев, V - калибрующая часть, VI - участок после протягивания. На участке врезания, как видно из осциллограмм, деформация растёт по мере врезания каждого последующего зуба. При основном протягивании / участок III / деталь находится под действием ряда кольцевых нагрузок, расположенных на расстоянии шага друг от друга и эта система сил перемещается вдоль детали со скоростью v , при этом число зубьев всё время меняется на единицу: один зуб выходит, другой через некоторое время врезается в деталь. Поэтому на участке основного протягивания наблюдается пульсация деформации, вызванная врезанием и выходом зубьев. Величина деформации от действия одного зуба равна u_2 . Кроме того, на осциллограмме видно постепенное приращение деформации за счёт тепловых явлений. После снятия нагрузки / выхода из детали калибрующей части протяжки / наружная поверхность не возвращается в первоначальное положение. Имеется остаточная деформация равная $u_{\Sigma \max}$ - эту деформацию мы считаем суммарной температурной деформацией. Если соединить точку 0 / стенка до деформирования / с точкой Б / стенка с остаточной тепловой деформацией / прямой линией, то можно с известным допущением принять, что деталь от повышения

температуры деформируется по этой линии. u_{Σ} - суммарная упругая деформация определяется как разница между u_{Σ} в какой-либо точке и $u_{\Sigma T}$ - температурной деформацией для этой же точки.

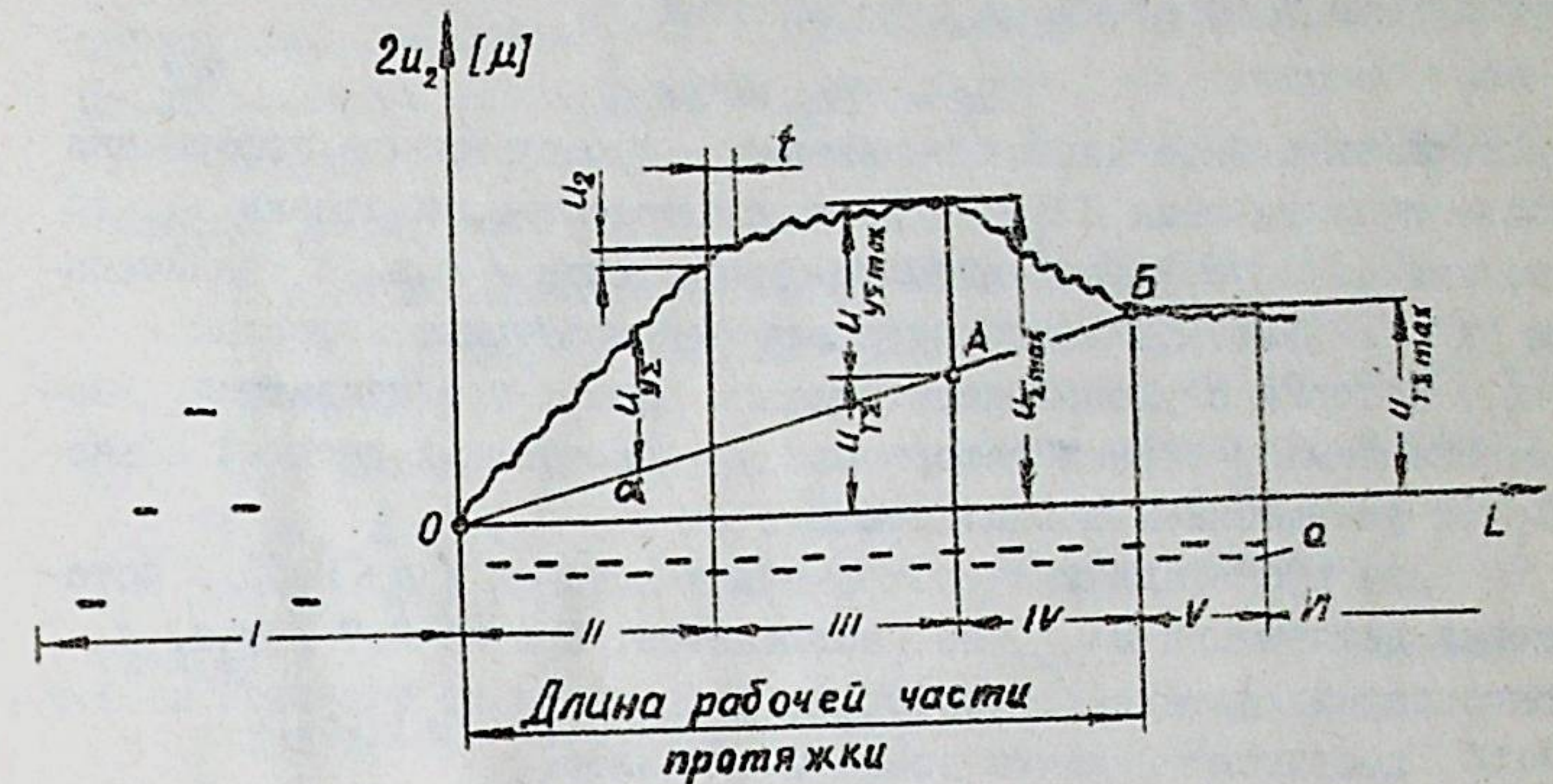


Рис.3. Типовая осциллограмма суммарной радиальной деформации: а - импульсы от замыкания контактов с лезвиями протяжки, u_2 - упругие деформации от одного зуба, t - шаг протяжки, u_{Σ} - суммарные упругие деформации, $u_{\Sigma T}$ - суммарные температурные деформации, $u_{\Sigma \max}$ - максимальные суммарные деформации.

На участке IV, когда число одновременно режущих зубьев начинает уменьшаться, происходит снятие нагрузки, величина упругой деформации уменьшается, температурные же деформации продолжают расти / отрезок АБ /. Характер участка АБ и всей линии ОВ в большей мере зависит от скорости резания. Всё это справедливо в случае отсутствия остаточных деформаций от приложенных сил. Для определения - зависит ли прирост диаметрального размера после протягивания от температурных или от температурно-остаточных деформаций и каким является отношение между температурными и радиальными остаточными деформациями, было использовано специальное устройство, жестко закреплённое на детали и позволяющее следить за изменением деформаций после протягивания. С помощью этого устройства перед экспериментом отмечалось начальное положение наружной поверхности, когда исследуемая поверх-

ность не имеет деформации. После протягивания прибор показывает суммарные деформации наружной поверхности $2u_{2\Sigma}$. Когда деталь остыла были отмечены остаточные деформации. Следовательно, температурные деформации определяются как разница между суммарными и остаточными деформациями

$$2u_{2T} = 2u_{2\Sigma} - 2u_{2ост.} \quad /8/$$

Экспериментальные данные показывают, что суммарные деформации после протягивания $2u_{2\Sigma}$ на наружной поверхности стенки детали увеличиваются с уменьшением толщины стенок / т.е. с увеличением "к" /. Заметную величину имеют температурные деформации $2u_{2T}$, которые с уменьшением толщины стенок увеличиваются. Увеличение температурных деформаций у тонкостенных деталей объясняется уменьшением массы детали.

При протягивании толстостенных деталей / $k < 0,55$ / остаточных деформаций $2u_{2ост.}$ не наблюдается. При $k > 0,7$ / т.е. у тонкостенных деталей / остаточные деформации на наружной поверхности достигают величин до 10 мк и более.

Как показывает опыт, при протягивании детали с постоянной толщиной стенок / "к" = конст. / с увеличением скорости протягивания величина суммарных деформаций $2u_2$ увеличивается, что, главным образом, связано с увеличением температурных деформаций $2u_{2T}$. Увеличение температурных деформаций объясняется изменением теплового баланса. Величина остаточных деформаций с изменением скорости протягивания не изменяется. Аналогичные эксперименты по распределению деформации $u_{T\Sigma}$ после протягивания проводились при обработке детали дорнованием. В проведенных опытах установлено существенное отличие от процесса протягивания. Из результатов опытов следует, что суммарные радиальные деформации $2u_{2\Sigma}$ с уменьшением толщины стенок увеличиваются, но одновременно температурные деформации $2u_{2T}$ / по данным эксперимента / не зависят от толщины стенок. Последнее можно объяснить тем, что у деталей с более толстыми стенками хотя и происходит более интенсивное трение и пластическая деформация обрабатываемой поверхности / в связи с уменьшением радиальных деформаций /, более толстая стенка имеет большую массу материала и потому нагревается меньше.

В конечном итоге температурные деформации остаются с некоторым допущением постоянной величины. В работе представлены результаты исследования суммарных, остаточных и температурных деформаций после протягивания и дорнования детали. По проведенным экспериментам установлено, что изменения скорости дорнования в пределах от 0,5 до 5,4 м/мин. не изменяют величины деформации наружной поверхности.

Изменение радиальных деформаций от подъема на зуб, скорости протягивания и материала детали

В эксперименте использованы заготовки из стали 45, диаметр протяжки $D = 35$ мм. Заготовки имели следующие параметры: $L = 75$ мм, $d = 34,0$ мм, $k = 0,32; 0,4; 0,42; 0,66$; подъемы на зуб $2a = 0,05$ мм; $0,1$ мм; $0,15$ мм. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Радиальные деформации в зависимости от коэффициента "к" и подъема на зуб 2а

$k = \frac{d_1}{d_2}$	Величина радиальной деформации		
	$2a = 0,05$	$2a = 0,10$	$2a = 0,150$
0,66	3	9,8	14,1
0,42	0,9	2,5	4,0
0,4	0,7	1,3	2
0,32	0,5	0,8	1,7

Как видно, подъем на зуб и толщина стенки в большой мере определяют величину радиальных деформаций. При стандартном подъеме на зуб / $2a = 0,05$ / ощутимые радиальные деформации начинаются лишь при значении коэффициента "к" более 0,42. Изменение радиальной деформации на наружной и внутренней стенке заготовок при разной скорости протягивания дано в таблице 5. Эти деформации получены при подъеме на зуб $2a = 0,05$ мм и при одновременной работе шести зубьев.

Таблица 5.

Радиальные деформации детали в зависимости от скорости резания / $2a = 0,05$ мм, одновременная работа пяти зубьев /

$k = \frac{d_1}{d_2}$	v м/мин	$2u_2$ мк	$2u_1$ мк
0,47	6,0	16	64
	1,20	14	56
	0,22	11	44

Как видно из таблицы, радиальные деформации с увеличением скорости резания увеличиваются. Важную роль играет рост температурных деформаций, являющийся главной причиной изменения характера радиальных деформаций. Чтобы иметь представление об изменении радиальных деформаций в зависимости от твердости различных сталей при протягивании с разными подъемами на зуб, были сравнены радиальные деформации деталей из более твердой стали / сталь 45; HRB = 80 / и мягкой стали / Ст.5; HRB = 48 /. Ввиду того, что тонкостенные заготовки больше подвержены радиальным деформациям и на них более ярко видны причины, изменяющие радиальные деформации, в опытах были использованы заготовки, имеющие коэффициент "к" = 0,8. Для одновременного определения влияния подъема на зуб на радиальные деформации заготовок, сделанных из разных сталей, протягивание проведено с разными подъемами: $2a = 0,05$ мм; $0,1$ мм; $0,15$ мм; $0,21$ мм.

Изменение радиальных деформаций на наружной и внутренней поверхности втулкообразной детали при разном подъеме на зуб и в зависимости от физико-механических свойств материалов, представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Изменение радиальных деформаций в зависимости от материала детали при разных значениях подъема на зуб

Материал	$k = \frac{d_1}{d_2}$	$2a$ мм	$2u_1$ мм	$2u_2$ мм
сталь 45	0,8	0,050	2,5	3,4
		0,100	8,1	11,0
		0,150	11,2	15,1
		0,210	15,3	20,6
Ст. 5	0,8	0,050	1,0	1,4
		0,100	1,5	2,6
		0,150	3,1	4,1
		0,210	7,2	9,6

Глава IV. ВЗАИМОСВЯЗЬ ВЛИЯНИЯ ОСЕВЫХ СИЛ P_z И ЖЕСТКОСТИ ДЕТАЛЕЙ НА РАДИАЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

В этой главе описаны результаты исследования осевых сил P_z во взаимосвязи с радиальными деформациями $2u_2$. Установлено, что величины осевых сил и радиальных деформаций непосто-

яны по длине заготовок и претерпевают значительные изменения на концах заготовок. Изменения P_z и $2u_2$ объясняются тем, что деталь в сечениях вдоль всей оси имеет неодинаковую жесткость. Наименьшая жесткость наблюдается на торцах детали, которая при удалении от них возрастает. Установлено, что при достижении расстояния $0,8l$, жесткость достигает своей максимальной величины равной жесткости сечений "бесконечно длинной" трубы. Также установлено, что сила трения на опорном конце заготовок $F = \mu P_z$ вызывает здесь повышение жесткости детали. Приведенные результаты опытов показывают, что на величине силы трения F и деформации $2u_2$ сказываются величина площади и конфигурация реального контакта детали с опорной планшайбой. У исследованных толстостенных деталей в зависимости от типа опоры конечная деформация отличалась приблизительно на 60 мк.

Изменения силы P_z и деформации детали у выходного торца при многократном дорновании представлены на рис. 4. Из рисунка

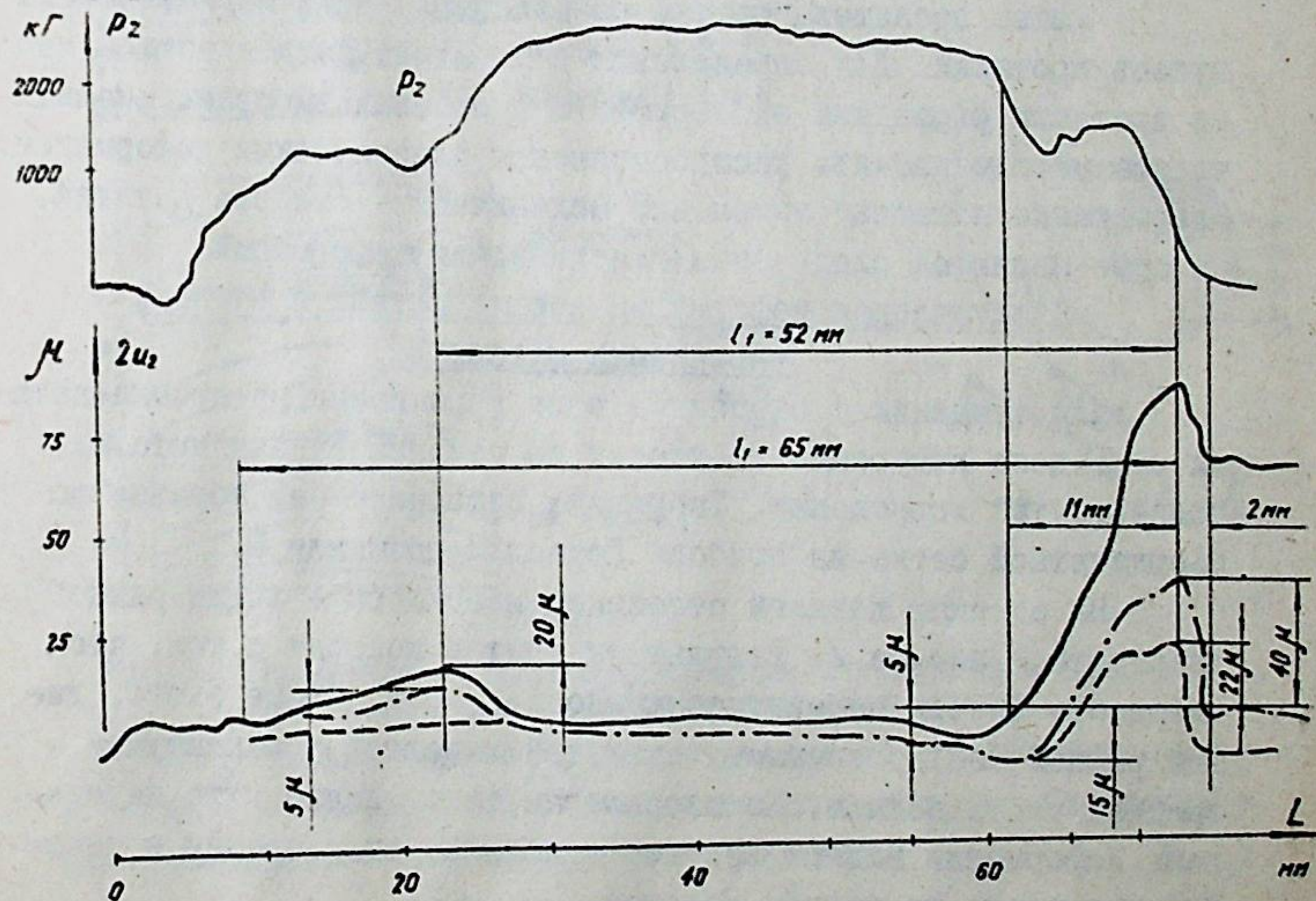


Рис. 4. Измерение силы P_z и деформации детали $2u_2$ у выходного торца по мере продвижения дорна $\varnothing 26$ мм / $\delta r = 0,2$ мм /

видно, что изгиб стенки детали на опорном конце заготовки в месте измерения происходит два раза. Первый изгиб стенки от перемещающегося дорна начинается тогда, когда дорн приближается на расстояние $l_1 = 65$ мм до места измерения, достигая своего максимума при $l_1 = 52$ мм / где $2u_2 = 20$ мк /. Дальнейшее движение дорна вызывает уменьшение радиальных деформаций и переход их в отрицательные, имеющие максимум при $l = 11$ мм / где $2u_2 = 5$ мк /. Вторая деформация отличается от первой резким ростом радиальных деформаций в положительном направлении. Эти деформации доходят до $2u_2 = 75$ мк при первом, 40 мк во втором и 20 мк третьем повторном дорновании.

На входном торце заготовок получены также отрицательные деформации, т.е. входной торец заготовок при повторном дорновании сужается.

Глава V. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Глава посвящена опытам по выяснению роли выглаживающих зубьев протяжки. Для определения параметров выглаживающей части протяжки проведены эксперименты и проанализированы аналитические методы расчёта распространения пластических деформаций. Здесь также показано изменение механических свойств деталей, которые являются следствием пластических деформаций.

Пластическая деформация стенки детали и степень упрочнения материала

Для суждения о степени и поле упрочнения материала детали проведено измерение твёрдости по сечению стенки деталей, подвергнутых дорнованию. Твёрдость измерялась на образце по координатной сетке на приборе Роквелла по шкале В.

На стенках деталей строились изосклеры - линии равной твёрдости / рис.5а /. Результаты опытов говорят о том, что твёрдость детали неравномерна вдоль её оси. Кроме этого, линии равной твёрдости имеют выгнутый характер с максимумом в средней части детали. По изосклерам также видно, что на степень деформации влияют жёсткость детали, сила трения и течение материала на концах деталей.

На рис.5а видно, что степень упрочнения материала зависит от его пластичности и начальной твёрдости. Максимальная

твёрдость повышается по сравнению с исходной у стали 45 в 1,25 раз, у Ст.3 в 2 раза, у латуни Д0-62-1 в 3,5 раза, у алюминия Д-16 в 6,5 раз

Непосредственное определение основных характеристик материала, произведено путём снятия диаграмм растяжения. Из отдельных участков детали /рис.5 б/, находящихся на разных расстояниях от обрабатываемой поверхности, были вырезаны стандартные образцы диаметром в 6 мм. Как видно, предел прочности по сечению увеличивается в 1,6 раза. При сравнении пределов прочности, достигнутых в результате упрочнения при дорновании с натягом $2\delta r_1 = 2$ мм, у толстостенной и тонкостенной деталей / центр вырезанного образца располагался на расстоянии 3,5 мм от обрабатываемой поверхности / видно, что предел прочности у первых выше / $P_p = 1580$ /, чем у вторых / $P_p = 1380$ /.

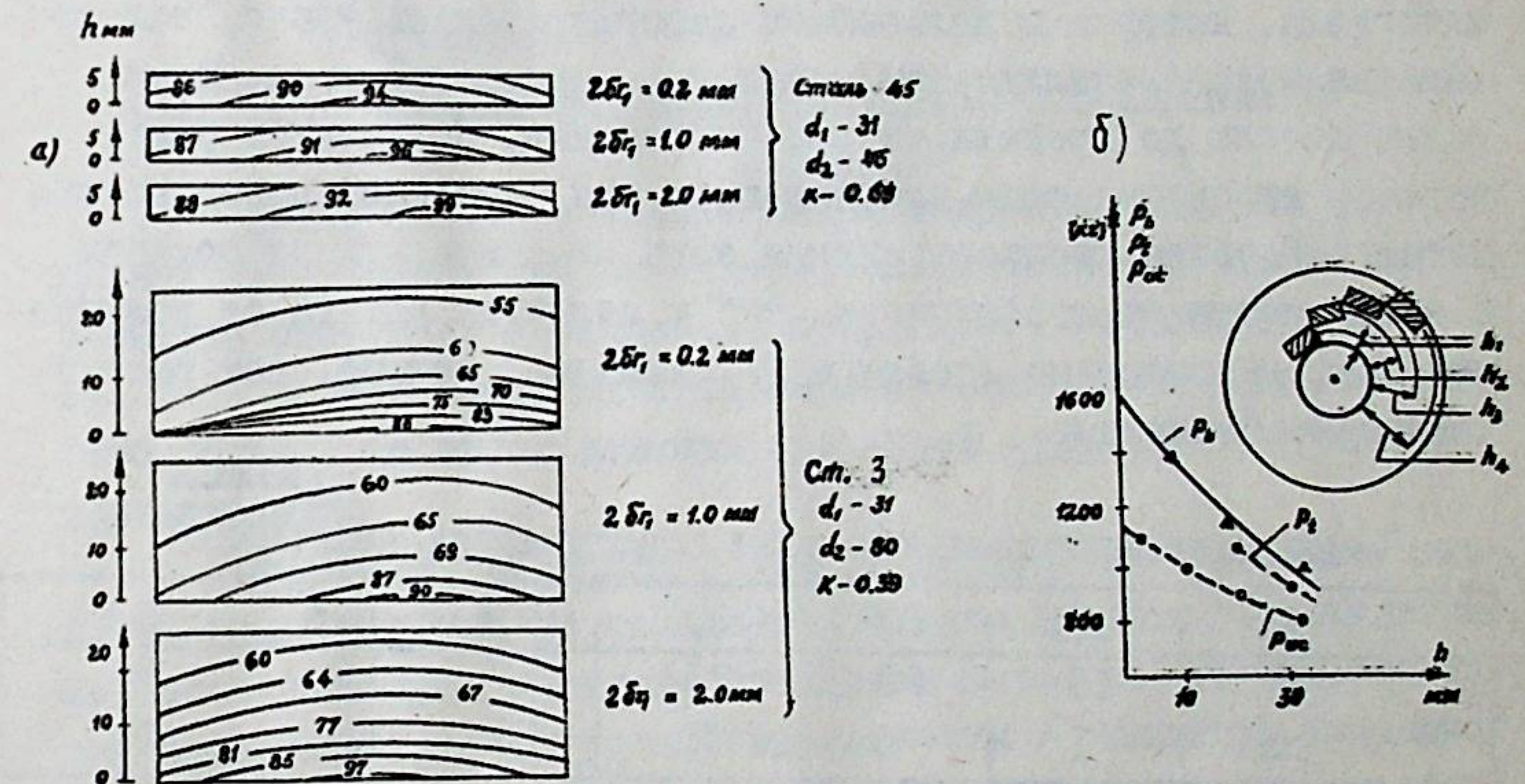


Рис.5. Изменение твёрдости, предела прочности и предела текучести материала при дорновании.

Для решения задачи по теоретическому определению зоны пластических деформаций ρ использовано выражение из работы Ю.Г.Проскурякова для полупругого периода

$$\frac{\delta r_1}{r_1} = \frac{\sigma_{co}}{E} \cdot \frac{\rho^2}{r_1^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{S_0}{E} \quad /9/$$

ρ равняется

$$\rho = \sqrt{\frac{r_2^2(\delta r_1 \cdot E + \frac{2}{3} S_0)}{\sigma_{e0}}} \quad / 10/$$

где r_1 - внутренний радиус детали,
 δr_1 - натяг дорнования на сторону,
 σ_{e0} - начальный предел упругости материала,
 E - модуль упругости,
 S_0 - давление дорнования при начале полной перегрузки / зависит от модуля упрочнения D_m , от отношения внутреннего и наружного радиусов /.

Для экспериментального определения радиуса ρ / и глубины / пластической деформации использован метод Артманова для определения предела текучести материала при растяжении. На наружной поверхности детали создавались локальные участки наклёпанного материала, которые в дальнейшем деформировались иначе, чем остальная масса металла. При повышении напряжений в наружных слоях детали до предела текучести участки, получившие ранее наклёп, проявляют себя вспучиванием над остальной поверхностью детали. Глубина распространения зоны пластических деформаций в зависимости от коэффициента "к" и величины натяга δr_1 полученная экспериментально /таблица 7/ оказалась меньше, чем рассчитанная по формулам.

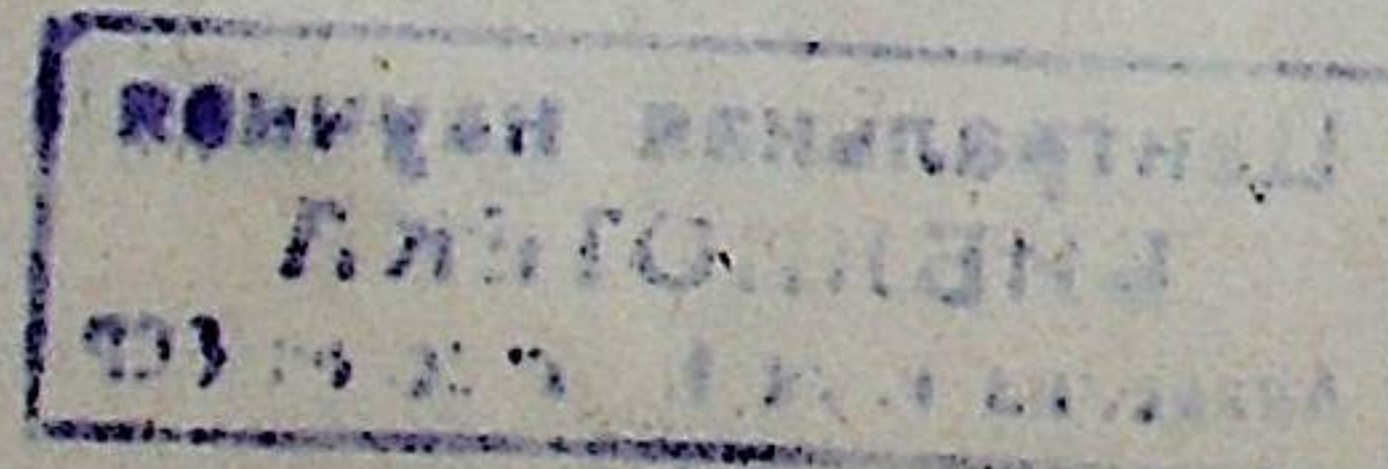
Таблица 7.

Глубина распространения зоны пластических деформаций.

δr_1 мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
ρ мм	15	19	21	24	29	34
h мм	1	4	7	10	15	20

Определение глубины пластической деформации и минимального натяга

Используя локальный наклёп, в работе представлены следующие производственные методы для определения параметра дорнования: а/ определение глубины пластической деформации при заданном натяге / заготовка имеет коническую наружную поверхность, глубину пластической деформации определяют непосредственным измерением /; радиус пластических деформаций выражается как половина диаметра в месте появления вспучивания:



$$\rho_n = \frac{d_2^n}{2} \quad /11/$$

где ρ_n - радиус границы появления вспучивания,
 d_2^n - диаметр этого сечения.

б/ определение минимального натяга, при котором вся стенка детали переходит в пластическое состояние / используется внутренняя коническая поверхность заготовки /. Минимальный натяг определяется по следующей формуле

$$\delta r_{min} = l_x \frac{d_{max} - d_{min}}{2L} \quad /12/$$

где d_{max} - максимальный внутренний диаметр заготовки,
 d_{min} - минимальный внутренний диаметр заготовки,
 L - длина детали,
 l_x - расстояние от начала дорнования до появления вспучивания.

Глава VI. ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

В главе проведён анализ ранее полученных данных о радиальных деформациях для выяснения закономерностей изменения размеров отверстия и появления погрешностей обработки. В результате даны рекомендации по определению фактически действующего подъёма на зуб / толщина срезаемой стружки / в процессе протягивания.

Фактически действующий подъём на зуб. На основании аналитических расчётов по деформации стенок втулкообразных деталей от лезвия зуба протяжки предложен метод определения упругих деформаций на внутренней поверхности / закрытой протяжкой / с помощью переходного модуля C_K , который обозначает отношение между деформациями внутренней u_1 и наружной u_2 поверхностей

$$C_K = \frac{u_1}{u_2} \quad /13/$$

Изменение переходного модуля C_K в зависимости от коэффициента "к" / характеризующего толщину стенок и жёсткость детали / дано в таблице 8.

Таблица 8.

Изменение переходного модуля C_K от коэффициента "к".

$k = \frac{d_1}{d_2}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
C_K	5,3	3,83	2,78	1,67	1,37

Определение фактически действующего подъема на зуб рекомендуется вести следующим образом: 1/ определяются упругие радиальные деформации $2u_2$ на наружной поверхности с помощью прибора /рис.1/; 2/ определяются суммарные радиальные деформации $2u_1$ на внутренней поверхности по формуле

$$2u_1 = C_K \cdot 2u_2 \quad /14/$$

3/ определяется фактически действующий подъем на зуб $2a_\phi$ в ходе протягивания по формуле

$$2a_\phi = 2a - C_K \cdot 2u_2 \quad /15/$$

В результате проведенных опытов в данной работе установлено, что фактический подъем на зуб меняется в широких пределах в зависимости от коэффициента "к", подъема на зуб $2a$, скорости протягивания и физико-механических свойств обрабатываемого материала. Кроме этого установлено, что при длине обрабатываемой детали несколько больше шага между зубьями, фактически срезаемая толщина стружки по окружности лезвия неодинакова, а с изменением радиальных деформаций меняется; в результате появляется погрешность обрабатываемого диаметра в виде так называемой "восьмерки".

Установлено, что радиальные деформации меняются с изменением длины детали. Величина радиальных деформаций не зависит от длины деталей, когда их длина $L_d \geq 1,6r_2$. Для коротких деталей $L_d < 1,6$ величина упругих радиальных деформаций зависит от длины и может увеличиться в 1,5 - 1,8 раза. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при расчёте процесса протягивания и дорнования.

Если при $L < 1,6r_2$ остаточная деформация $\delta = \delta r_1 / \text{ост.}$, то

$$\text{при } L = 0,8r_2 \quad \delta = (\delta r_1)_{\text{ост.}} - 0,4 / 2u_1 /$$

$$\text{и при } L = 0,44r_2 \quad \delta = (\delta r_1)_{\text{ост.}} - 0,8 / 2u_1 / \quad /16/$$

где $2u_1$ - максимальная упругая деформация внутреннего диаметра заготовки.

При дорновании тонкостенных деталей с очень большими натягами $\delta r_1 = 1,5$ мм; $L = 40$ мм; $r_1 = 12$ мм; $r_2 = 17$ мм; материал детали Ст.3 / установлено, что внутренняя обрабатываемая поверхность получила "бочкообразную" форму с отклонением 0,1 мм

в средней части заготовки.

Относительное рассеивание радиальных деформаций определялось путём исследования их при разной толщине стенки деталей. Для этого введен коэффициент относительного рассеивания радиальных деформаций

$$\lambda = \frac{\Delta 2u_2}{2u_{2\text{ср}}} \quad /17/$$

где $\Delta 2u_2$ - величина рассеивания радиальных деформаций, $2u_{2\text{ср}}$ - среднее значение радиальных деформаций.

С уменьшением толщины стенки детали, как показали данные опытов, рассеивание радиальных деформаций увеличивается, как по абсолютной, так и по относительной величине. Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9.

Изменение коэффициента относительного рассеивания радиальных деформаций.

$k = \frac{a}{a_2}$	0,8	0,7	0,6	0,5
$\Delta 2u_2$ мк	4	1,75	0,8	0,3
$2u_{2\text{ср}}$	7	4	2	1
	0,575	0,44	0,4	0,3

Из таблицы видно, что коэффициент относительного рассеивания тонкостенных деталей / $k = 0,8$ / почти в 2 раза больше, чем у толстостенных деталей / $k = 0,5$ /.

Исследование суммарных радиальных деформаций проведено с помощью осциллограмм, рассматривая их от начала и до конца протягивания. Наибольшее рассеивание радиальных деформаций установлено у заготовок во время резания первыми зубьями протяжек, где рассеивание $\Delta 2u_2 = 10$ мк. При основном протягивании, когда процесс является более стабильным, чем при врезании, величина рассеивания радиальных деформаций уменьшается и составляет лишь 3 мк. На участке выхода зубьев из заготовки и у калибрующей части величина рассеивания радиальных деформаций весьма незначительна.

Установлено, что относительное рассеивание радиальных деформаций λ при обработке заготовок многозубным инструментом меньше, чем при обработке однозубным, т.е. процесс деформации становится более устойчивым с увеличением числа зубьев протяжки.

ВЫВОДЫ

Совокупность изучения упруго-пластических радиальных деформаций при внутреннем протягивании по экспериментальным и расчётным данным позволяет сделать следующие основные выводы:

1/ Предлагаемый прибор, аппаратура и методика исследования радиальных деформаций позволяют записывать их с точностью до 1 мк.

2/ Установлено, что величина упругих радиальных деформаций зависит: а/ от коэффициента "к", характеризующего относительную толщину стенок и жесткость детали;

б/ от длины детали L_d , радиальные деформации коротких заготовок $L_d < 1,6r_2$ могут быть в два раза больше;

в/ от подъёма на зуб, при изменении подъёма $2a$ от 0,5 до 0,15 мм величина радиальных деформаций $2u_2$ находится в пределах от 1 до 2,5 мк / при $k=0,3$ /; от 2,5 до 5 мк /при $k=0,4$ /; от 7 до 20 мк /при $k=0,8$ /.

г/ от физико-механических свойств материала, у мягких материалов /Ст.5/ величина упругих радиальных деформаций по своему среднему значению меньше. У более твёрдых материалов /сталь 45/ процесс радиального деформирования происходит значительно более устойчиво.

д/ от скорости протягивания - с увеличением скорости протягивания радиальные деформации растут.

Суммарные радиальные деформации /температурные и остаточные / с увеличением коэффициента "к" увеличиваются.

Остаточные радиальные деформации при протягивании толстостенных деталей $k < 0,55$ не наблюдаются. У тонкостенных деталей $k > 0,7$ остаточные радиальные деформации могут достигнуть величины до 10 мк и более.

При дорновании остаточные радиальные деформации наблюдаются у толстостенных деталей. С уменьшением толщины стенок остаточные деформации принимают значительные величины.

3/ Предложенная формула для расчёта радиальных деформаций на наружной поверхности экспериментально подтверждена.

Характер распространения радиальных деформаций вдоль оси детали является волнообразным. Установлено также, что про-

цесс радиального деформирования протекает весьма нестабильно, имеют место колебания, пики и искажения радиальных деформаций при врезании зубьев в заготовку.

4/ Установлены особенности деформации детали при протягивании: а/ непостоянство сил P_y и P_z вдоль оси детали вызывает непостоянные деформации; осевое и радиальное усилия на торцах заготовок уменьшаются.

б/ наибольшие изменения радиальных деформаций наблюдаются на расстоянии $0,8r_2$ от торцов заготовок.

в/ величина радиальных деформаций на опорном торце заготовок меньше, чем на свободном.

г/ на торцах заготовок установлена возможность появления отрицательных радиальных деформаций.

5/ В результате исследования изменения свойств материала детали при дорновании установлено: а/ твёрдость детали неравномерна вдоль оси: ближе к торцам твёрдость уменьшается, линии равной твёрдости имеют выгнутый характер с максимумом в средней части.

б/ степень упрочнения материала при данном натяге зависит в основном от начальной твёрдости материала и коэффициента "к".

6/ Установлено изменение фактически срезаемой толщины стружки при протягивании и её влияние на точность обработки:

а/ радиальные деформации уменьшают толщину срезаемой стружки на величину $2u_2 C_k$.

б/ с увеличением коэффициента "к" растёт величина $2u_2 C_k$ и уменьшается толщина снимаемой стружки при протягивании.

в/ у коротких заготовок $L_d < 1,6r_2$, где радиальные деформации больше, для получения такого же диаметра необходимо соответственно увеличить подъём на зуб $2a$.

7/ Данные о радиальных деформациях можно использовать для определения параметров протягивания.

По материалам диссертации опубликованы работы:

1. Апин Л.Р., Кочетков Я.П. Исследование динамических радиальных деформаций при внутреннем протягивании. Сб. трудов РПИ "Вопросы механики и машиностроения", т.17, вып.2, 1965.

2. Кочетков Я.П., Апин Л.Р. Авторское свидетельство № 200236

"Устройство для измерения усилий, например, при протягивании цилиндрических деталей", 28-5-1966.

3. Апин Л.Р., Кочетков Я.П. О некоторых явлениях в процессе деформирования детали при протягивании и дорновании. Сб. трудов РПИ "Вопросы точности протягивания", вып.7, 1967.

4. Апин Л.Р., Кочетков Я.П. Пластические деформации детали в процессе дорнования. Сб. трудов РПИ "Вопросы точности протягивания", вып. 7, 1967.

5. Кочетков Я.П. Определение деформации элемента наборного дорна при работе с большим натягом. Сб. трудов РПИ "Вопросы механики и машиностроения", вып.3, 1968.

6. Апин Л.Р., Кочетков Я.П. Изменение упругих остаточных и температурных деформаций при дорновании в зависимости от жесткости и длины деталей. Сб. трудов РПИ "Вопросы механики и машиностроения", вып. 3, 1968.

7. Апин Л.Р., Кочетков Я.П. Рассеивание по величине радиальных деформаций при внутреннем протягивании. Сб. трудов РПИ "Вопросы точности протягивания", вып.8, 1969, находится в печати.

8. Апин Л.Р., Кочетков Я.П. Радиальные деформации детали и фактическая толщина срезаемой стружки при работе одним зубом протяжки. Сб. трудов РПИ "Вопросы точности протягивания", вып. 8, 1969, находится в печати.

9. Кочетков Я.П. Радиальные деформации протягиваемых деталей. Сб. трудов ЧПИ, 1969, находится в печати.

По теме диссертации сделаны доклады:

1. Влияние тепловых процессов на точность протягивания. Рига, РПИ, 3 февраля 1965г.

2. Исследование динамических радиальных деформаций при внутреннем протягивании. Рига, РПИ, 11 мая 1965г.

3. Особенности деформации детали и влияние сил трения на радиальные деформации при протягивании. Рига, РПИ, 17 мая 1967г.

4. Изменение механических свойств деталей при обработке дорнованием. Рига, ЛатинТИ, 5 марта 1968г.

5. Исследование упруго-пластических деформаций при внутреннем протягивании. Москва, МВТУ, 31 октября 1968г.

6. Рассеивание радиальных деформаций при внутреннем протягива-

нии. Рига, РПИ, 15 мая 1969г.

7. Радиальные деформации втулкообразных деталей при внутреннем протягивании. Минск, СКБ протяжных станков, 12 июня 1969г.

Редактор Л.Левинская, художник Э.Розиньш, техн.ред. Г.Ванаг

Подписано к печати 11 июня 1969 г. Формат 60x90/16.

1,75 печ.л. 1,53 изд.л. Тираж 200 экз. Бесплатно. ЯТ 15288.

РИО РПИ. Ротапринт. Ул.Ленина, 1. Зак. № 454/519