

УДК 621.787 (045)
135

УДК 621.787
5830-11/82

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

На правах рукописи

Мазин Петр Германович

УДК.621.787

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ И РАЗМЕРОВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ
ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1982

ЧПИ

Челябинский завод
"Тракторостроительский"

Работа выполнена на кафедре "Станки и инструмент" Челябинско-
го политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
профессор МЕНЬШАКОВ В.М.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники
РСФСР, доктор технических наук,
профессор ПАШЕВ Д.Д.;

кандидат технических наук, доцент
СИМАХИН И.А.

Ведущее предприятие - Челябинский тракторный завод
им. В.И.Ленина.

Защита диссертации состоится "5" октября 1982 г.,
в 14 ч., на заседании специализированного совета К 053.13.01
по присуждению ученой степени кандидата технических наук в
Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола
(454044, г. Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью
предприятия, просим направлять на имя ученого секретаря специали-
зированного совета.

Автореферат разослан "24" августа 1982 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
профессор



В.М.Меньшаков

904

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В решениях XXVI съезда КПСС ставится задача значительного повышения качества продукции. Повышение качества продукции, с народнохозяйственной точки зрения, равнозначно дополнительному ее выпуску, т.е. дает экономию живого труда, металла, затрат на ремонт и запчасти.

Одним из методов повышения качества деталей машин является поверхностное пластическое деформирование (ППД). Методы ППД успешно применяются на автомобильных, тракторных, моторных и других заводах. Наиболее широко ППД применяется при обработке наружных и внутренних поверхностей вращения.

Однако практика показала, что повышение эффективности ППД сдерживается отсутствием широкодиапазонных аналитических зависимостей, связывающих параметры качества детали и параметры технологического процесса, несовершенством методик проектирования технологических процессов. Для комбинированной обработки (ППД с последующей закалкой ТВЧ), повышающей устойчивость остаточных напряжений к релаксации, до сих пор не разработаны зависимости, описывающие взаимосвязь параметров ППД с остаточными напряжениями после термообработки. Кроме того, для автоматизации проектирования технологических процессов на основе оптимизационных математических моделей технологических операций, необходимо иметь функциональные зависимости между заданными параметрами качества деталей и параметрами технологической операции, раскрыть сущность этапов проектирования технологических операций и связь между решениями, принимаемыми на различных этапах проектирования. Поэтому разработка теоретически обоснованных рекомендаций и методик по проектированию технологических операций ППД и комбинированной обработки является актуальной.

Цель работы. На основе исследования взаимосвязи остаточных напряжений и деформаций с технологическими параметрами разработать научно обоснованные методики и рекомендации по проектированию технологических процессов выглаживания отверстий, обкатывания и комбинированной обработки, обеспечивающих заданные качественные параметры деталей машин.

Задачи работы. I. Установить теоретически взаимосвязь остаточных напряжений и деформаций с основными параметрами операции выглаживания отверстий.

2. Установить теоретически взаимосвязь остаточных напряжений и деформаций с основными параметрами технологической операции обкатывания.

3. Установить взаимосвязь остаточных напряжений при комбинированной обработке с основными параметрами технологической операции обкатывания.

4. На основе полученных зависимостей разработать научно обоснованные инженерные методики и рекомендации по проектированию технологических операций выглаживания отверстий, обкатывания и комбинированной обработки.

Научная новизна. Теоретически показано немонокотное влияние величины натяга (давления) при выглаживании отверстий (при обкатывании) на характер остаточных напряжений. Установлены аналитические зависимости для определения остаточных напряжений и толщины наклепанного слоя в готовой детали, размеров заготовки и инструмента при выглаживании отверстий. Объяснены теоретически и описаны аналитически известные факты спада к обработанной поверхности остаточных сжимающих напряжений и возможность формирования при ПЦД растягивающих остаточных напряжений. Получены зависимости для определения остаточных напряжений и деформаций в обработанной детали и размеров заготовки при обкатывании. Установлена зависимость остаточных напряжений при комбинированной обработке от основных параметров операции обкатывания.

Практическая ценность работы. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные методики назначения параметров операции выглаживания отверстий: предельных размеров и шероховатости заготовки, предельных размеров инструмента, обеспечивающих заданные чертежом качественные параметры деталей машин (шероховатость, предельные размеры, толщину наклепанного слоя, остаточные напряжения). Разработаны рекомендации по назначению параметров обкатывания и комбинированной обработки, обеспечивающих заданные чертежом качественные параметры. Полученные зависимости могут быть использованы в качестве ограничений по точности и качеству поверхности в оптимизационных технологических моделях при автоматизации проектирования технологических операций ПЦД. Разработано обкатывающее устройство, защищенное авторским свидетельством,

Реализация результатов работы. Результаты внедрены на Челябинском механическом заводе, Кыштымском графито-каолиновом комбинате,

Катайском насосном заводе и др. Методики расчета переданы на одиннадцать предприятий: Челябинский тракторный завод, Уральский автозавод, Ижевский машиностроительный завод и другие. Экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 190 тыс. рублей.

Апробация работы. Работа докладывалась на зональных научно-технических конференциях с участием ученых по проблемам ППД: в Красноярске (1971 г.), Челябинске (1976 г.), Новосибирске (1978 г.); межотраслевых семинарах: в Челябинске (1976 г.) и в Киеве (1978 г., 1979 г.); отраслевых семинарах: в Челябинске (1977 г.), Свердловско (1981 г.); конференциях Челябинского политехнического института (1970-1981 гг.); научно-техническом семинаре кафедры "Технология нефтяного и химического машиностроения", Куйбышев, 1982 г.; объединенном заседании кафедр "Технология машиностроения", "Технология металлов", "Станки и инструмент", "Автоматизация механосборочного производства", Челябинский политехнический институт, 1982 г.

Публикации. По теме опубликовано 23 работы и получено авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объем работы. Работа состоит из шести разделов, общих выводов, списка литературы, включающего 168 наименований и 17 приложений. Работа содержит 145 страниц, 26 рисунков, 35 таблиц.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫГЛАЖИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ, ОБКАТЫВАНИИ И КОМБИНИРОВАННОМ ОБРАБОТКЕ

Распределение остаточных напряжений, их устойчивость к релаксации являются одним из важных параметров качества деталей машин.

Экспериментальными исследованиями выявлены следующие особенности распределения остаточных напряжений при ППД: в поверхностном слое деталей формируются благоприятные сжимающие остаточные напряжения, переходящие на некотором расстоянии от поверхности в растягивающие; максимум сжимающих остаточных напряжений может формироваться не на обработанной поверхности, а под ней; возможно формирование на обработанной поверхности вредных растягивающих остаточных напряжений.

Имеющиеся эмпирические зависимости для остаточных напряжений являются узкодиапазонными и не могут служить основой для разработки научно обоснованных методик и рекомендаций по проектированию технологических процессов ППД. Теоретические зависимости не учитывают упрочнения материала детали при обработке либо историю нагружения и разгрузки. При построении аналитической модели принимают для обра-

бываемого материала диаграмму жестко пластического тела или исключают из рассмотрения возможность появления пластических деформаций при разгрузке. Вследствие указанных допущений, существующие расчетные схемы позволяют объяснить и аналитически описать не все вышеуказанные экспериментальные результаты (смещение максимума сжимающих остаточных напряжений с поверхности в глубину, возможность формирования на обработанной поверхности растягивающих остаточных напряжений). Это затрудняет проектирование технологических операций ПЦ.

В основу решения проблемы получения адекватных зависимостей для ПЦ положим работы А.А.Ильющина и В.В.Москвитина об остаточных напряжениях.

Рассматривая остаточные напряжения как результат наложения напряженно-деформированных состояний при нагружении и последующей разгрузке

$$\sigma_{ij}^0 = \sigma_{ij} - \bar{\sigma}_{ij}^0, \quad (1)$$

где σ_{ij}^0 - остаточные напряжения; σ_{ij} - напряжение при нагружении; $\bar{\sigma}_{ij}^0$ - напряжение при разгрузке, получим для выглаживания отверстий возможные случаи формирования остаточных напряжений:

1) при нагружении в некоторой области детали произошли пластические деформации, остальная часть детали осталась в упругом состоянии; при последующей разгрузке вся деталь деформируется только упруго. При такой истории нагружения в распределении остаточных напряжений в обработанной детали можно выделить две области: а) область, в которой имели место пластические деформации при нагружении и упругие при разгрузке; б) область, в которой и при нагружении и при разгрузке материал деформировался упруго;

2) нагружение аналогично первому случаю; при разгрузке в некоторой области детали произошла пластическая деформация. При таких условиях в обработанной детали можно выделить три области:

а) область, в которой имели место пластические деформации при разгрузке и пластические деформации при нагружении; б) область, в которой имели место пластические деформации при нагружении и упругие деформации при разгрузке; в) область, которая при нагружении и при разгрузке деформировалась упруго;

3) при нагружении стенка детали пластически деформируется на всю толщину; при разгрузке вся стенка деформируется упруго. В этом случае имеем в детали одну область, в которой при нагружении были пластические деформации; при разгрузке - упругие деформации;

4) нагрузка аналогично третьему случаю, разгрузка - второму случаю. При этом в детали имеем две области: область, в которой имели место пластические деформации при нагружении и упругие - при разгрузке.

Примем для выглаживания отверстий расчетную схему, обоснованную Ю.Г.Проскуряковым, т.е. осесимметричное нагружение толстостенной трубы внутренним давлением.

Использование решения В.В.Москвитина для определения остаточных напряжений в упруго-пластическом теле с линейным упрочнением, в соответствии с зависимостью (I) дает, например, для второго случая в области, в которой имели место пластические деформации и при нагружении и при разгрузке (эта область всегда прилегает к внутренней поверхности), т.е. при

$$\sigma_z^o = -\frac{2}{\sqrt{3}} \lambda \sigma_T \ln \frac{z}{a} + (1-\lambda) \frac{\sigma_T (z^2 - a^2)(z_s^2 - 2z_o^2)}{\sqrt{3} z^2 a^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_T^o = -\frac{2}{\sqrt{3}} \lambda \sigma_T \ln \frac{z}{a} - \frac{2\lambda \sigma_T + (1-\lambda) \sigma_T (z^2 + a^2)(z_s^2 - 2z_o^2)}{\sqrt{3} z^2 a^2}, \quad (3)$$

где a - радиус отверстия; z - текущий радиус; z_o - радиус, отделяющий область пластической деформации при разгрузке от упругой области; σ_z^o - радиальные остаточные напряжения; λ - коэффициент линейного упрочнения материала детали; σ_T - предел текучести материала детали; z_s - радиус, отделяющий область пластической деформации при нагружении от упругой области; σ_T^o - тангенциальные остаточные напряжения.

В области, в которой были пластические деформации при нагружении, а при разгрузке - упругие деформации, т.е. при $z_o \leq z \leq z_s$ будем иметь

$$\sigma_z^o = -\rho + \frac{2}{\sqrt{3}} \lambda \sigma_T \ln \frac{z}{a} + (1-\lambda) \frac{\sigma_T z_s^2 (z^2 - a^2)}{\sqrt{3} z^2 a^2} - \frac{2\sigma_T z_o^2 (z^2 - \beta^2)}{\sqrt{3} z^2 \beta^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_r^0 = -p + \frac{2}{\sqrt{3}} \lambda \sigma_T \ln \frac{z}{a} + (1-\lambda) \frac{\sigma_T z_s^2 (z^2 + a^2)}{\sqrt{3} z^2 a^2} + \frac{2\sigma_T \lambda}{\sqrt{3}} - \frac{2\sigma_T z_0^2 (b^2 + z^2)}{\sqrt{3} z^2 b^2}, \quad (5)$$

где p - давление при выглаживании; b - радиус наружной поверхности детали.

В области, в которой были упругие деформации при нагружении и разгрузке, т.е. при $z_s \leq z \leq b$, получим

$$\sigma_z^0 = \frac{\sigma_T (z^2 - b^2)(z_s^2 - 2z_0^2)}{\sqrt{3} z^2 b^2}, \quad (6)$$

$$\sigma_r^0 = \frac{\sigma_T (z^2 + b^2)(z_s^2 - 2z_0^2)}{\sqrt{3} z^2 b^2}. \quad (7)$$

Входящие в выражения (2)-(7) давление p радиусы z_0 и z_s связаны между собой уравнениями (по В.Москвитину)

$$-p + \frac{2\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{z_s}{a} + \frac{\sigma_T z_s^2}{\sqrt{3} a^2} \left(1 - \lambda - \frac{a^2}{b^2}\right) + \frac{\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} = 0, \quad (8)$$

$$-p + \frac{4\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{z_0}{a} + \frac{2\sigma_T z_0^2}{\sqrt{3} a^2} \left(1 - \lambda - \frac{a^2}{b^2}\right) + \frac{2\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} = 0. \quad (9)$$

Остаточные напряжения для всех рассмотренных случаев нагружения-разгрузки связаны с основным технологическим параметром-натягом i :

в первом и втором случаях через радиус z_s

$$i = \frac{2(1-\nu)\sigma_T z_s^2}{\sqrt{3} G a}, \quad (10)$$

где G - модуль сдвига;

в третьем и четвертом случаях через давление p

$$i = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda)G} \frac{a b^2}{b^2 - a^2} \left(p - \frac{2\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a}\right). \quad (11)$$

Расчет остаточных напряжений при выглаживании отверстий дает эшеры, близкие к экспериментальным. Так, при натягах, обуславливающих первый случай, максимум остаточных тангенциальных напряжений находится на обработанной поверхности (рис.1, кривая 1).

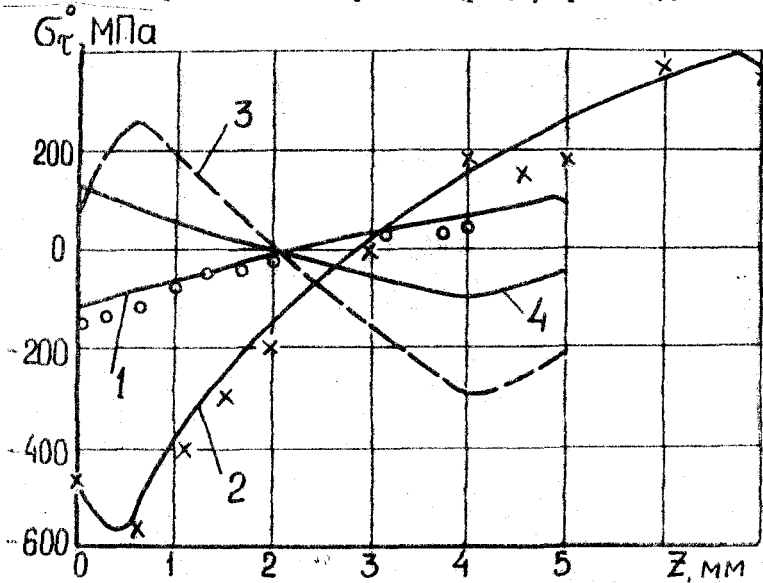


Рис.1. Распределение остаточных напряжений при выглаживании отверстий в деталях из стали 45: 1 - натяг 0,15 мм, отношение диаметров 1,33 (0 - экспериментальные результаты) И.В. Поздняковой); 2 - толщина наклепанного слоя 2,5 мм, отношение диаметров 2,76 (x - экспериментальные результаты Е.С.Товпенца, П.С.Сахарова); 3 (экспериментальные результаты В.Г.Проскуракова), 4 (расчет) - натяг 3,665 мм, отношение диаметров 1,31

Условием существования второго случая является величина натяга, которая зависит от механических свойств материала детали и отношения радиусов ее наружной и внутренней поверхностей. В работе установлено, что второй случай возможен при условии

$$b/a \geq 2,50 - \sqrt{1,078 - \lambda^2} \quad (12)$$

При натягах, делющих второй случай, максимум остаточных сжимающих тангенциальных напряжений смещен с поверхности в глубину (рис. 1, кривая 2).

При дальнейшем увеличении натяга (случай четвертый) на обработанной поверхности могут формироваться растягивающие остаточные напряжения (рис. 1, кривая 3, 4).

Таким образом, влияние величины натяга на остаточные напряжения при выглаживании отверстий немонотонно. Одинаковую величину остаточных напряжений на поверхности можно получить при двух разных толщинах наклепанного слоя и, естественно, при соответствующих им разных натягах.

Аналогично влияние величины давления при обкатывании. Так, например, зависимость для тангенциальных напряжений σ_{τ} при обкатывании имеет вид:

$$\sigma_{\tau} = -\xi^{\frac{b-3}{2}} \frac{P}{\Delta \alpha^2 \lambda^2} J_1 \left\{ C_1 \left[(\lambda^2 \xi^2 + k_1) W_{\chi, \mu} - (2\mu - 1) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 - \nu) W_{\chi+1, \mu} \right] + C_2 \left[(\lambda^2 \xi^2 + k_2) W_{-\chi, \mu} - (2\mu - 1)(1 - \nu) W_{-\chi+1, \mu} \right] \right\} - \\ - \xi^{\frac{b-3}{2}} \frac{P \nu}{\Delta \lambda^2} J_0 \left\{ C_1 \left[2\left(\mu - \frac{1}{2} - \chi\right) \left(\mu - \frac{1}{2} + \xi \lambda\right) W_{\chi, \mu} - \right. \right. \\ \left. \left. - (2\mu - 1) W_{\chi+1, \mu} \right] + C_2 \left[2\left(\mu - \frac{1}{2} + \chi\right) \left(\mu - \frac{1}{2} + \lambda \xi\right) W_{-\chi, \mu} - (2\mu - 1) W_{-\chi+1, \mu} \right] \right\} \quad (13)$$

где $\xi = 1 + kZ$; $b, k, \alpha, \lambda, \Delta, \chi, \mu$ - параметры; J_0, J_1 - функции Бесселя; W - функции Уиттекера; r, Z - координаты расчетной точки; C_1, C_2, k - коэффициенты, что дает близкое к экспериментальным данным распределение остаточных напряжений.

В результате анализа имеющихся зависимостей и исследований по комбинированной обработке и закалке ТВЧ было предположено, что ПЦ влияет в основном на структурную составляющую остаточных напряжений

$$\sigma^0 = \sigma_t^0 + K \sigma_{\text{стр}}^0, \quad (14)$$

где σ^0 - остаточные напряжения при комбинированной обработке; σ_t^0 - тепловая составляющая остаточных напряжений; K - коэффициент влияния (наследования) ПЦ; $\sigma_{\text{стр}}^0$ - структурная составляющая остаточных напряжений. Корреляционный и регрессионный анализы подтверждают такую зависимость и позволили найти эмпирические выражения для коэффициента влияния K .

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЫГЛАЖИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ И ОБКАТЫВАНИИ

Изменение размеров деталей при ПЦД определяется в основном величиной давления, обеспечивающего тот или иной случай напряженно-деформированных состояний при нагружении и разгрузке и связано с остаточными напряжениями.

Для первого случая напряженно-деформированных состояний нагружения и разгрузки при выглаживании отверстий изменения размеров цилиндрической детали имеют вид

$$\Delta 2a = \frac{2\sigma_T(1-\nu)z_s^2}{\sqrt{3} G a} - \frac{2\rho a}{E} \left[\frac{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} + \nu \right] \quad (15)$$

$$\Delta 2b = \frac{2\sigma_T(1-\nu)z_s^2}{\sqrt{3} G b} - \frac{4\rho a^2}{E\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)}, \quad (16)$$

где $\Delta 2a$ — изменение диаметра отверстия; $\Delta 2b$ — изменение диаметра наружной поверхности; E — модуль упругости.

Для второго случая будем иметь

$$\Delta 2a = \frac{2\sigma_T(1-\nu)z_s^2}{\sqrt{3} G a} - \frac{2\sigma_T z_o^2}{\sqrt{3} G a}, \quad (17)$$

$$\Delta 2b = \frac{2(1-\nu)\sigma_T z_s^2}{\sqrt{3} G b} - \frac{2\sigma_T z_o^2}{\sqrt{3} G b}, \quad (18)$$

для третьего случая

$$\Delta 2a = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda)G} \frac{ab^2}{b^2 - a^2} \left(\rho - \frac{2\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a} \right) - \frac{2\rho a}{E} \left[\frac{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} + \nu \right], \quad (19)$$

$$\Delta 2b = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda)G} \frac{a^2 b}{b^2 - a^2} \left(\rho - \frac{2\lambda\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a} \right) - \frac{4\rho a^2}{Eb\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)}, \quad (20)$$

для четвертого случая

$$\Delta 2a = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda)G} \frac{ab^2}{b^2-a^2} \left(p - \frac{2\lambda G_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a} \right) - \frac{2G_T z_0^2}{\sqrt{3} G a}, \quad (21)$$

$$\Delta 2b = \frac{2(1-\nu)}{(1-\lambda)G} \frac{a^2 b}{b^2-a^2} \left(p - \frac{2\lambda G_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a} \right) - \frac{2G_T z_0^2}{\sqrt{3} G b}. \quad (22)$$

При определении предельных размеров заготовок под выглаживание отверстий необходимо учитывать разброс механических характеристик обрабатываемого материала, шероховатость поверхности отверстий, деформации инструмента и допуск на диаметры детали по чертежу (рис. 2). На рисунке обозначены: d_0 - диаметр отверстия в инструменте; $d_{u_{нм}}, d_{u_{нд}}$ - наибольший и наименьший диаметры наружной поверхности инструмента; T_u - допуск на наружный диаметр инструмента; $\Delta d_{u_{нм}}, \Delta d_{u_{нд}}$ - упругие деформации инструмента при наибольшем и наименьшем натягах; $d_{u_{нм}}^p, d_{u_{нд}}^p$ - наибольший и наименьший диаметры инструмента при его работе; $i_{нд}, i_{нм}$ - наибольший и наименьший фактические натяги; $i_{u_{нд}}, i_{u_{нм}}$ - наибольший и наименьший натяги по инструменту; $2a_{0нм}, 2a_{0нм}, 2a_{0нд}$ - предельные диаметры отверстия заготовок; $\Delta 2a_{нд}, \Delta 2a_{нм}$ - изменение диаметра отверстия при наибольшем и наименьшем натягах; $2a_{нм}, 2a_{нд}$ - наименьший и наибольший предельные диаметры отверстия по чертежу; T_a - допуск на диаметр отверстия по чертежу; $\Delta 2b_{нм}, \Delta 2b_{нд}$ - изменение диаметра наружной поверхности детали при наименьшем и наибольшем натягах; $2b_{нм}, 2b_{нд}$ - наименьший и наибольший диаметры наружной поверхности детали после выглаживания отверстия.

Параметры, определяющие размеры заготовки, связаны уравнением

$$T_a + T_u - \Delta 2a_{нм} - \Delta d_{u_{нм}} + i_{нм} = i_{нд} - \Delta d_{u_{нд}} - \Delta 2a_{нд}. \quad (23)$$

Предельные диаметры отверстия заготовок определяются выражениями

$$2a_{0нд} = 2a_{нд} - \Delta 2a_{нм}, \quad (24)$$

$$2a_{0нм} = 2a_{нм} - \Delta 2a_{нд}. \quad (25)$$

Размеры инструмента определяются по выражениям:

$$d_{u_{нм}} = 2a_{0нд} + i_{нм} + \Delta d_{u_{нд}}, \quad (26)$$

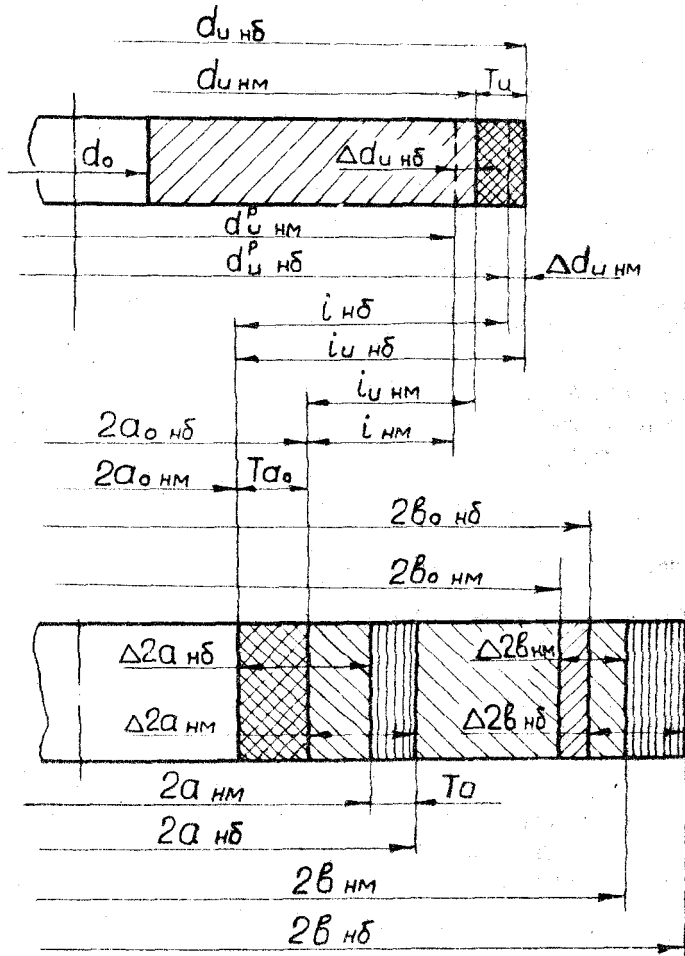


Рис.2. Схема для определения размеров при выглаживании отверстий

$$d_{u_{нд}} = d_{u_{нм}} + Tu \quad (27)$$

Для отверстия по схеме (рис.2) имеем

$$Ta_0 - Ta = \Delta 2a_{нд} - \Delta 2a_{нм} \quad , \quad (28)$$

отсюда, вследствие неравенства

$$\Delta 2a_{нд} - \Delta 2a_{нм} > 0 \quad , \quad (29)$$

получим условие $Ta < Ta_0 \quad , \quad (30)$

т.е. при выглаживании отверстий рассеивание диаметров отверстия уменьшается.

При необходимости на операции выглаживания отверстий обеспечить размер наружной поверхности, предельные диаметры наружной поверхности заготовок определяются выражениями

$$2b_{o_{нд}} = 2b_{нд} - \Delta 2b_{нд} \quad , \quad (31)$$

$$2b_{o_{нм}} = 2b_{нм} - \Delta 2b_{нм} \quad . \quad (32)$$

Аналогично, для наружной поверхности, по схеме (рис.2) имеем

$$Tb - Tb_0 = \Delta 2a_{нд} - \Delta 2b_{нм} \quad , \quad (33)$$

где Tb_0, Tb - допуски на диаметр наружной поверхности заготовки и детали, отсюда, вследствие неравенства

$$\Delta 2b_{нд} - \Delta 2b_{нм} > 0 \quad (34)$$

получим условие $Tb > Tb_0 \quad , \quad (35)$

т.е. при выглаживании отверстий поле рассеивания диаметров наружной поверхности увеличивается.

Экспериментальные исследования подтверждают возможность использования полученных зависимостей для определения размеров при выглаживании отверстий.

При обкатывании изменение радиуса наружной поверхности обрабатываемой детали определяется связанным с выражением (13)

$$U_z = \frac{1+\nu}{E_0} \left\{ \xi^{\frac{6+3}{2}} \frac{Rk^2}{\Delta \alpha^2} J_0 \left\{ C_1 \left[(\lambda^2 \xi^2 + \gamma_3) W_{\chi, \mu} - (\lambda \xi - 2(1-\nu)) \chi \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times W_{\chi+1, \mu} \right\} + C_2 \left[(\lambda^2 \xi^2 + \gamma_4) W_{-\chi, \mu} - (\lambda \xi - 2(1-\nu)) \chi \right] W_{-\chi+1, \mu} \right\} \quad , \quad (36)$$

где U_z - изменение радиуса детали; E_0 - модуль упругости материала при нулевом приближении расчета (упругое деформирование).

Пределные диаметры заготовки определяются выражениями

$$D_{0\text{нб}} = D_{0\text{ср}} + \frac{T}{2}, \quad (37)$$

$$D_{0\text{нм}} = D_{0\text{ср}} - \frac{T}{2}, \quad (38)$$

где $D_{0\text{нб}}$, $D_{0\text{нм}}$ - наибольший и наименьший предельные диаметры заготовки; T - допуск на диаметр детали,

$$D_{0\text{ср}} = \frac{D_{\text{нб}} + D_{\text{нм}}}{2} + 2U_z, \quad (39)$$

где $D_{\text{нб}}$, $D_{\text{нм}}$ - наибольший и наименьший предельные размеры детали по чертежу.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Результаты исследований позволили разработать научно обоснованные инженерные методики и рекомендации по проектированию технологических операций выравнивания отверстий, обкатывания и комбинированной обработки.

Последовательность этапов проектирования и связь между решениями, принимаемыми на различных этапах проектирования технологических операций выравнивания отверстий, зависят от комплекса требований чертежа детали. Для наиболее типичного комплекса требований чертежа (чертежом заданы: шероховатость отверстия, наибольшая и наименьшая предельные величины остаточных напряжений, наибольший и наименьший предельные размеры детали) проектирование операции осуществляется в следующем порядке:

- 1) назначение метода предварительной обработки отверстия и шероховатости отверстия заготовки;
- 2) определение по данным Ю.Г. Проскурякова, В.М. Меньшакова и зависимостям (8)-(11) наименьшего (по шероховатости) натяга $i_{\text{нм}1}$;
- 3) определение по зависимостям (2)-(11) наименьшего натяга $i_{\text{нм}2}$ (по заданной наименьшей предельной величине остаточных напряжений); при невозможности обеспечить заданные остаточные напряжения, следует согласовать с конструктором их величину или материал и отношение наружного и внутреннего диаметров детали, или применить другой метод обработки отверстия;

4) выбор из двух полученных наименьших натягов большего i_{HM} ; если при этом $i_{HM1} > i_{HM2}$, то допуск на отверстие заготовки будет меньше (уменьшится и поле рассеивания отверстия в детали), чем допускает чертёж; избежать уменьшения допуска на заготовку можно уменьшением шероховатости отверстия заготовки, если это допустимо по технологическим соображениям (себестоимости, выполнимости);

5) расчет по зависимостям (13), (17), (19), (21) наименьшего изменения диаметра отверстия;

6) расчет упругой деформации инструмента;

7) расчет по заданной наибольшей предельной величине остаточных напряжений и зависимостям (2)-(11) наибольшего натяга $i_{H\delta_1}$;

8) расчет по уравнению (23) наибольшего натяга $i_{H\delta_2}$, обеспечивающего максимальное использование допуска на деталь для назначения максимального допуска на заготовку;

9) выбор из двух полученных наибольших натягов - наименьшего; если при этом $i_{H\delta_1} < i_{H\delta_2}$, то допуск на отверстие заготовки будет меньше (уменьшится и поле рассеивания диаметров обработанных отверстий), чем допускает чертёж; если $i_{H\delta} < i_{HM}$, то следует уменьшить шероховатость отверстия заготовки или согласовать вопрос с конструктором;

10) расчет по формулам (24), (25) предельных диаметров отверстия заготовки, допуска на этот диаметр; по формулам (26), (27) размеров инструментов;

11) проверка детали на прочность;

12) назначение скорости и вида смазки при обработке

13) определение осевой силы при выглаживании и назначение оборудования.

Пример номограммы (рис.3), построенной для вышеприведенного варианта, свидетельствует о том, что по ней и данным чертежа можно назначить параметры заготовки и инструмента.

На рис.3 обозначены: $\sigma_{\tau n}^o$ - остаточные напряжения на обработанной поверхности; $\Delta = \Delta d_u / 2a$.

Обработку наружной поверхности при проектировании технологических процессов, в связи с условием (35), следует назначать после выглаживания отверстия. Предельные диаметры наружной поверхности заготовки при необходимости определяются по формулам (31), (32).

Рекомендации по проектированию технологических операций обкатывания и комбинированной обработки разработаны на основе полученных в работе зависимостей для напряжений, деформаций и размеров.

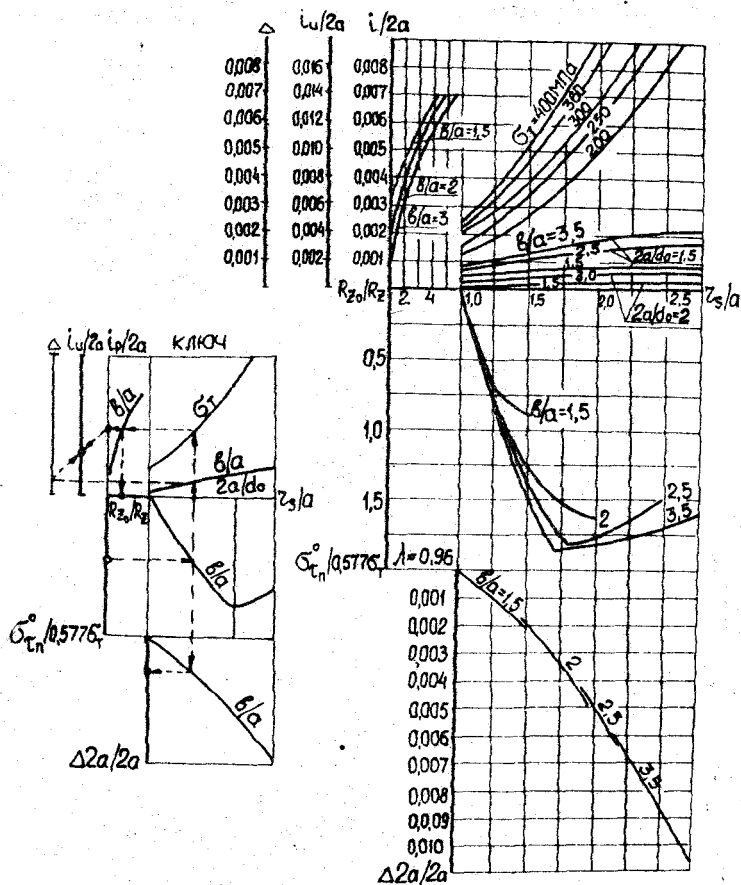


Рис. 3. Номограмма для назначения параметров операции
вышлифовывания отверстий

Разработанные методики и рекомендации переданы на II предприятий страны. Внедрение результатов работы в технологических процессах обработки втулок, деталей крупногабаритных подшипников, тормозных шкивов, опорных роликов на Челябинском механическом заводе, Кыштымском графито-каолиновом комбинате, Кагайском насосном заводе и других дало экономический эффект 190 тыс. рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аналитически установлено, что величина натяга при выглаживании отверстий влияет на характер изменения остаточных напряжений на обработанной поверхности немонотонно. Существует величина натяга, определяемая механическими свойствами обрабатываемого материала и отношением диаметров наружной и внутренней поверхности детали, при которой величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности наибольшая. При дальнейшем увеличении натяга максимум сжимающих остаточных напряжений смещается с поверхности на некоторую глубину, сжимающие остаточные напряжения на поверхности уменьшаются и возможно формирование на ней растягивающих остаточных напряжений.

2. Аналитически установлено, что величина допусков на диаметры заготовки при выглаживании отверстий определяется заданными чертежом шероховатостью, точностью, величиной остаточных напряжений и толщиной наклепанного слоя. Аналитически показано, что точность размеров отверстий после выглаживания повышается, точность размеров наружных поверхностей — снижается.

3. Величина давления при обкатывании оказывает воздействие на поверхностные слои качественно аналогичное натягу при выглаживании отверстий.

4. Установленные зависимости, подтвержденные экспериментально, позволили разработать научно обоснованные инженерные методики и рекомендации по проектированию технологических процессов выглаживания отверстий, обкатывания и комбинированной обработки, обеспечивающих требования чертежа.

5. Внедрение разработанных методик и рекомендаций на ряде заводов дало экономический эффект 190 тыс. рублей.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ковалев Р.М., Меньшаков В.М., Мазеин П.Г. Исследование влияния режимов обкатывания стальных деталей перед закалкой на их износостойкость. - В сб.: "Вопросы надежности и долговечности машин". Красноярск: ИИИ, 1972, с.72-75.
2. Ковалев Р.М., Мазеин П.Г. Влияние накатывания шариком на точность цилиндрических деталей. - В сб.: Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1972, с.159-162.
3. Меньшаков В.М., Мазеин П.Г. Расчет тангенциальных остаточных напряжений в накатанных деталях. - Вестник машиностроения, 1976, № 11, с.26-28.
4. Мазеин П.Г., Меньшаков В.М. Остаточные напряжения в стали, упрочненной поверхностным пластическим деформированием и закалкой ТВЧ. - В сб.: Новые и прогрессивные методы механической обработки труб, обеспечивающие их высокие эксплуатационные качества. - Челябинск: УРАЛНИТИ, 1976, с.55-56.
5. Мазеин П.Г., Меньшаков В.М., Шермин В.И. Устройство для чистовой и упрочняющей обработки обкатыванием. А.с. № 517475. БИ 1976, № 22.
6. Позднякова И.В., Мазеин П.Г., Ковалев Р.М., Лесников А.И. Исследование чистовой обработки отверстий в деталях из стали 75Х28В. В сб.: Прогрессивная технология чистовой обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1976, с.139-141.
7. Мазеин П.Г., Меньшаков В.М. Расчет эпюры остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании с последующей закалкой ТВЧ. - В сб.: Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. - Новосибирск: НЭТИ, 1978, с.59-60.
8. Мазеин П.Г., Раевский А.Н. Обеспечение эффективности обработки поверхностным пластическим деформированием. - В сб.: Повышение эксплуатационных свойств деталей машин технологическими методами. - Иркутск: ИПИ, 1978, с.145-147.
9. Мазеин П.Г. Методика расчета остаточных напряжений при ИИД. - В сб.: Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1978, с.128-129.

10. Мазеин П.Г., Позднякова И.В. Остаточные напряжения при наличии вторичных пластических деформаций в полем толстостенном цилиндре. - В сб.: Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1978, с.129-132.

11. Мазеин П.Г., Меньшаков В.М. Специальный накатник. - Машиностроитель, 1980, № 6, с.30-31.

12. Мазеин П.Г., Меньшаков В.М., Шермин В.И. Обкатник для упрочнения цилиндрических деталей поверхностным пластическим деформированием. Информ. листок о научно-техническом достижении № 77-81.- Челябинск: ЦНТИ, 1981, - 3 с.

13. Мазеин П.Г. Аналитический расчет напряжений при поверхностном пластическом деформировании. - В сб.: Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧПИ, 1980, с.104-107.