

На правах рукописи
УДК 621.77.01, 621.777.4

Бодарева Анастасия Вячеславовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ВТУЛОК
МЕТОДОМ СОВМЕЩЕНИЯ РЕДУЦИРОВАНИЯ И ДОРНОВАНИЯ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2015

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Воронцов Андрей Львович,
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана»,
кафедра технологии обработки материалов

Официальные оппоненты: Сосёнушкин Евгений Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»,
профессор кафедры систем пластического
деформирования

Лисунец Николай Леонидович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
доцент кафедры технологии и оборудования
трубного производства

Ведущая организация: «Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН»

Защита состоится «_____» _____ 2015 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании
диссертационного совета Д212.141.04 в Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5
Телефон для справок: 8-499-267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим направлять по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и
на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Семенов В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Для повышения эффективности изготовления деталей необходимо постоянное совершенствование технологии в различных отраслях производства. Наиболее распространенными деталями, используемыми в огромном количестве разнообразных изделий являются втулки, например втулки автомобильных стартеров, втулки под фланец трубопроводов, промежуточные и кондукторные втулки металлорежущих станков, а также многие другие. От их надежности зависит работоспособность отдельных узлов и конструкции в целом.

Особенно ответственными являются втулки, входящие в подвижные сопряжения деталей тяжело нагруженных механизмов (механические редукторы, элементы двигателей автомобилей и тракторов, элементы ходовых частей летательных аппаратов). К таким втулкам предъявляют высокие требования по эксплуатационным свойствам и качеству изготовления, в частности, прочности, твердости, точности размеров и формы, чистоте поверхности. Наряду с этим к технологии изготовления таких деталей предъявляют требования максимального повышения производительности и снижения себестоимости изготовления, в частности, за счёт увеличения коэффициента использования металла.

Анализ имеющейся технической информации показывает, что для получения ответственных втулок используют такие операции холодной объёмной штамповки как редуцирование и дорнование, а их совмещение в одном процессе штамповки позволит повысить эффективность изготовления. Однако совмещённый процесс редуцирования–дорнования изучен недостаточно. Поэтому отсутствие достаточной научной базы, позволяющей уверенно выбрать оптимальные параметры и режимы осуществления совмещённого процесса редуцирования–дорнования, является главным сдерживающим фактором широкого промышленного применения этого прогрессивного способа изготовления ответственных втулок.

Актуальной задачей данной работы является проведение углублённого научного исследования совмещённого процесса редуцирования–дорнования для уточнения его важнейших закономерностей и получения высокоточных формул, обеспечивающих надёжное проектирование высокоэффективного технологического процесса изготовления с использованием данной операции.

Объектом исследования является холодная объёмная штамповка.

Предметом исследования является изготовление высокопрочных прецизионных втулок методом совмещения редуцирования и дорнования.

Цель и задачи работы.

Целью работы является разработка методики расчёта технологических параметров совмещённого процесса редуцирования–дорнования, обеспечивающих получение заданных втулок с повышенными прочностью, размерной точностью и чистотой поверхности при минимальном количестве

переходов, меньшей силе деформирования и повышенном коэффициенте использования металла.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе полной системы классических уравнений теории пластического течения определить кинематическое, напряжённое и деформированное состояния трубной заготовки в процессе её одновременного редуцирования и дорнования.

2. Учесть влияние на напряжённое состояние и силу деформирования следующих факторов:

- упрочнения материала заготовки;
- различного соотношения углов конусности матрицы и дорна;
- высот калибрующих поясков матрицы и дорна;
- различных коэффициентов трения на поверхностях контакта заготовки и инструмента.

3. Определить:

- критерии, исключающие потерю жёсткости или устойчивости заготовки.
- оптимальные углы конусности матрицы и дорна, при которых сила деформирования и энергетические затраты будут минимальны при получении наибольшей деформации стенки за один переход, что увеличит разовое формоизменение и повысит производительность процесса.

5. Выявить важнейшие физические закономерности совмещённого процесса редуцирования–дорнования с тем, чтобы разработать методику проектирования технологии изготовления втулок с помощью совмещённого процесса редуцирования–дорнования и разработать методику оценки предельного формоизменения заготовки за один переход.

6. Провести экспериментальную проверку полученных теоретических результатов и сопоставить их с имеющимися опытными данными других исследователей

7. Опробовать в промышленных условиях технологический процесс изготовления с помощью совмещённого редуцирования–дорнования ответственных высокопрочных прецизионных втулок.

Методы исследования.

Определение параметров кинематического, напряжённого и деформированного состояний материала производилось с помощью полной системы классических уравнений теории пластического течения Леви–Мизеса, сформулированной для торовой системы координат и дополненной теорией конечных накопленных деформаций Ильюшина.

Для анализа возможной потери устойчивости использовалась классическая теория Эйлера.

Экспериментальное определение сил деформирования проводилось на немецкой универсальной испытательной машине Prüfmaschine ZD-40, имеющей измеритель силы с погрешностью не более 1%.

Определение твёрдости производилось по стандартной методике ГОСТ 9012-59 (в официальной редакции 2007 г.) на сертифицированном в России стационарном твердомере по Бринеллю НВ-3000В, обладающем высокой точностью и повторяемостью тестирования, соответствующей стандартам ISO6506.81 и ASTM E-10.

Определение шероховатости поверхности производилось по стандартной методике ГОСТ 2789–73 (в официальной редакции 2006 г.) на профилографе-профилометре модели 252 завода «Калибр».

Достоверность результатов.

Достоверность научных положений, формул, выводов и рекомендаций работы подтверждается:

1) хорошей сходимостью полученных теоретических результатов как с многочисленными опытными данными других исследователей (среди 31 числового сравнения максимальное расхождение не превышало 9,2%), так и с большим количеством собственных экспериментов (215 числовых сравнений с наибольшим расхождением 5,5%);

2) успешным промышленным опробованием и намеченным дальнейшим внедрением в ОАО «НПП «Звезда» имени академика Г.И. Северина».

Научная новизна.

1) На основе решения полной системы классических уравнений механики деформируемого твёрдого тела определены все компоненты кинематического и напряжённого состояний заготовки, получено:

- формула, определяющая величину накопленной деформации в любой точке очага пластической деформации;
- формула, определяющая силу деформирования для произвольного соотношения углов конусности матрицы и дорна и разных коэффициентов трения в общем и частных случаях;
- формула оптимальных углов конусности инструмента, при которых деформирующая сила принимает минимальное значение;
- условие предотвращения потери жёсткости и устойчивости заготовки.

2) Доказано, что чем большую интенсивность упрочнения проявляет обрабатываемый материал, тем меньшую величину предельного обжатия он допускает.

3) Выявлены закономерности изменения силы деформирования и предельного обжатия за один переход в зависимости от углов конусности матрицы и дорна, коэффициентов трения, а также соотношений между размерами заготовки и получаемой втулки.

Теоретическая значимость работы.

Показан метод всестороннего механико-математического исследования закономерностей пластической деформации при совмещении в одном процессе редуцирования и дорнования, что позволит эффективно решать аналогичные научные задачи полного определения параметров кинематического, напряжённого и деформированного состояний материала при его обработке

давлением.

Практическая значимость работы.

Разработанная научно обоснованная методика расчета технологических параметров совмещённого процесса редуцирования–дорнования позволяет:

- определить все данные, необходимые для выбора кузнечно-прессового оборудования и расчета штампового инструмента на прочность;
- выбрать минимальное количество и режимы штамповочных переходов с учетом механических свойств материала заготовки и требуемых эксплуатационных показателей получаемого изделия.
- выбрать оптимальные решения еще на стадии предварительного проектирования технологического процесса и тем самым уменьшить затраты труда, материальных и финансовых средств;
- даны рекомендации по выбору наиболее рациональных параметров совмещённого процесса редуцирования–дорнования

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в:

- подготовке сведения по проводившимся ранее исследованиям отдельных и совмещенных процессов редуцирования и дорнования;
- анализе трёх возможных вариантов протекания пластической деформации с конкретизацией скоростей пластического течения и скоростей деформаций;
- получении формулы для напряжений, накопленных деформаций, оптимальных углов, удельной силы и полной силы деформирования совмещённого процесса редуцирования–дорнования;
- получении условия одновременного начала процесса редуцирования и дорнования, условие предотвращения потери жёсткости и устойчивости заготовки;
- определена величина предельного обжатия;
- сформулирован ряд выводов;
- проведено сопоставление результатов теоретических исследований с известными экспериментальными данными
- разработке методики расчёта технологических параметров совмещённого процесса редуцирования–дорнования, обеспечивающих получение заданных втулок ходового вала конкретного изделия, рассчитала все необходимые числовые параметры, провела успешные заводские испытания, обработала их результаты и сделала ряд полезных практических выводов.

Рекомендации к использованию

Полученные результаты и рекомендации приняты к использованию в ОАО «НПП «Звезда» имени академика Г.И. Северина» (Московская обл., пос. Томилино).

Апробация результатов работы.

Основные положения диссертации неоднократно излагались и

обсуждались на научных семинарах кафедры «Технологии обработки материалов», а также на объединённом научном семинаре кафедр «Технологии обработки давлением», «Оборудование и технологии прокатки», «Материаловедение» и «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Кроме этого, по результатам работы были сделаны доклады на конференциях:

3-й Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2010); Международной конференции «Индустриальные масла и смазочные материалы в металлургии и машиностроении» (Москва, 2011); 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2011); 3-й Всероссийской научно-практической конференции «Ремонт. Восстановление. Реновация» (Уфа, Башкирский ГАУ, 2012); Научно-технической конференции «Будущее машиностроения России» (Москва, 2012); Международной научно-практической конференции «Трибологические основы повышения ресурса машин» (Москва, 2012); 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2012); Международной научно-технической конференции (МК-12-ММФ) «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии» (Липецк, Липецкий ГТУ, 2012); Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению» (Москва, 2012); Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Липецк, Липецкий ГТУ, 2012); Научной конференции «Инновационные технологии и передовые инженерные решения» (Орехово-Зуево, НПП «Респиратор», 2012); 2-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, 2012); Международной научной конференции «Инноватика в технологии конструкционных материалов» (Москва, 2012); 3-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, 2014).

В 2012-2013 годах за результаты работы была назначена стипендия Президента РФ.

Публикации.

Основные положения диссертации отражены в 12 публикациях общим объёмом 15 п.л., включающих 7 статей в рецензируемых научно-технических журналах из перечня ВАК. В совместных работах с научным руководителем диссертанту принадлежит разработка математических моделей, проведение и обработка результатов экспериментов, формулировка выводов и рекомендаций.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 62 наименований, списка условных обозначений и приложения, изложенных на 188 страницах машинописного текста. Работа включает 56

рисунков и 22 таблицы.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) установленные теоретически и экспериментально условия, выполнение которых необходимо для успешного протекания совмещённого процесса редуцирования–дорнования;
- 2) установленные закономерности изменения оптимальных углов инструмента и предельного обжатия за один переход;
- 3) способы повышения величины предельного обжатия за один переход;
- 4) методика расчёта технологических параметров, обеспечивающих получение заданных втулок с повышенными прочностью, размерной точностью и чистотой поверхности при минимальном количестве переходов, меньшей силе деформирования и повышенном коэффициенте использования металла.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, раскрыты научная новизна и практическая ценность, а также перечислены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе проведён анализ существующих промышленных способов изготовления ответственных втулок, в результате которого установлено, что в наиболее эффективных технологиях используют отдельные операции редуцирования и дорнования, но максимальной эффективности можно добиться путём совмещения редуцирования и дорнования в одном процессе.

Рассмотрено современное состояние теории и экспериментальных исследований операций редуцирования трубных заготовок и дорнования отверстий, а также проанализированы достоинства и недостатки использованных методов теоретических исследований, таких как инженерный метод, метод баланса работ (энергетический метод), метод конечных элементов и метод пластического течения А.Л. Воронцова.

Рассмотрены работы по изучению отдельных процессов редуцирования и дорнования, выполненные Ю.А. Акименко, А.Л. Воронцовым, С.А. Зайдесом, А.Н. Исаевым, Ю.Г. Проскуряковым, А.М. Розенбергом, О.А. Розенбергом, В.Н. Романовым, В.Ф. Скворцовым, Э.С. Сухановым и др.

При этом отмечено, что, в отличие от отдельного изучения, исследования совмещённого процесса редуцирования–дорнования проводились в значительно меньшем объёме только Ю.К. Коваленко под руководством Ю.Г. Проскурякова. Ими получены ценные основополагающие результаты, которые, однако, в ряде случаев являются недостаточными, спорными или противоречивыми.

На основании проведённого литературного обзора в соответствии с поставленной целью сформулированы основные задачи исследования.

перемещения материальных точек среды (скорости течения) v_p , v_ϕ – были получены формулы, определяющие все перечисленные величины.

Это, соответственно, впервые позволило вывести формулы, определяющие все основные технологические параметры совмещённого процесса редуцирования–дорнования в общем случае не равных друг другу углов конусности матрицы α и дорна γ , и соответствующих разных коэффициентов пластического трения μ и μ_1 :

1. удельная деформирующая сила

$$q = 1,155\sigma_s \left\{ \left(1 + \frac{\mu + \mu_1}{\sin \alpha + \sin \gamma} \right) \ln \frac{R_0 - r_0}{R - r} + \frac{[R_0^2 - (r_0 + x)^2] \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} + x(2r_0 + x) \frac{\sin \gamma}{1 + \cos \gamma}}{2(R_0^2 - r_0^2)} + \frac{2h(\mu R + \mu_1 r) + (R - r - x_1)[R - r - x_1 + 2(r_0 + x)] \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} + x_1[2(r_0 + x) - x_1] \frac{\sin \gamma}{1 + \cos \gamma}}{2(R^2 - r^2)} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{где} \quad x = \frac{R_0 - r_0}{1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \gamma}}, \quad x_1 = \frac{R - r}{1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \gamma}}; \quad (2)$$

где

σ_s – напряжение текучести;

μ – коэффициент трения по напряжению текучести на матрице;

μ_1 – коэффициент трения по напряжению текучести на дорне;

R_0 – наружный радиус исходной трубной заготовки;

r_0 – радиус отверстия исходной трубной заготовки;

H_0 – высота исходной трубной заготовки;

R – наружный радиус втулки после деформации;

r – радиус отверстия втулки после деформации;

α – угол конусности рабочего участка матрицы;

γ – угол конусности рабочего участка дорна;

x, x_1 – границы очага пластической деформации

2. полная деформирующая сила

$$P = \pi(R^2 - r_0^2)q; \quad (3)$$

3. накопленная деформация

$$e_i = 1,155 \ln \frac{R_0 - r_0}{R - r}; \quad (4)$$

4. среднее по очагу пластической деформации напряжение текучести

$$\sigma_s = 0,5(\sigma_{s0} + \sigma_{ск}), \quad (5)$$

где

$\sigma_{s0} = \sigma_T$ – начальное напряжение текучести (предел текучести);

$\sigma_{ск}$ – конечное напряжение текучести;

при этом конечное напряжение текучести обрабатываемого материала на выходе из очага пластической деформации определяется по накопленной деформации e_i ;

5. условие одновременного начала редуцирования и дорнования

$$(r - r_0) \operatorname{tg} \alpha = (R_0 - R) \operatorname{tg} \gamma; \quad (6)$$

6. оптимальный по силе угол конусности инструмента

$$\alpha_{\text{опт}} = \arccos \left(\frac{1}{1 + \mu \ln \frac{R_0 - r_0}{R - r}} \right); \quad (7)$$

7. условие предотвращения потери жёсткости заготовки (т.е. появления пластических деформаций в её исходной части)

$$q < q_{\text{пр}} = 1,155 \sigma_{s0}; \quad (8)$$

8. предельное обжатие за один переход

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{w}{2} \left\{ \exp \left[\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \mu} \left(\frac{2}{1 + \sigma_{ск} / \sigma_{s0}} - \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} - \frac{\mu h}{w} \right) \right] - 1 \right\}, \quad (9)$$

где

w – толщина стенки готовой втулки;

h – высота калибрующих поясков матрицы и дорна;

под обжатием понимается $\Delta = r - r_0 = R_0 - R$, а величина $w = R - r$; (10)

9. предельная высота заготовки из условия предотвращения потери устойчивости

$$H_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\pi^3 E (R_0^4 - r_0^4)}{P}}, \quad (11)$$

где E – модуль упругости материала заготовки.

Наиболее объективная проверка полученных теоретических результатов путём их сопоставления с экспериментальными данными независимых исследователей показала хорошую сходимость – среди 31 числового сравнения максимальное расхождение не превышало 9,2%. Ряд таких сопоставлений иллюстрируют Рисунки 2–5.

В третьей главе изложены результаты собственной экспериментальной

проверки полученных теоретических формул и закономерностей, которая выполнялась потому, что представленные в известных работах эксперименты ограничивались лишь сравнительно тонкостенными втулками ($R/r=1,46...1,57$), малыми величинами обжатий ($\Delta=0,1...0,6$ мм), а также не легированными сталями.

Результаты выполненного теоретического исследования показывают, что на напряжённо-деформированное состояние заготовки при холодной обработке совмещёнными редуцированием и дорнованием влияют следующие основные факторы:

- 1) свойства материала заготовки;
- 2) радиальные размеры заготовки;
- 3) величина обжатия заготовки;
- 4) углы рабочих поверхностей матрицы и дорна;
- 5) высоты калибрующих поясков матрицы и дорна;
- 6) смазка.

Поэтому при проведении экспериментов выполнялось варьирование всех указанных факторов.

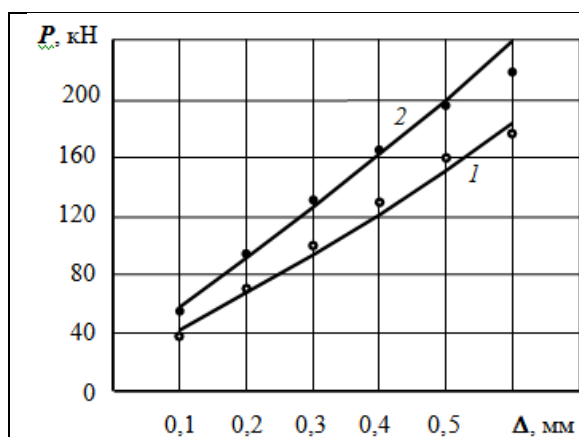


Рис. 2. Теоретическая зависимость деформирующей силы от обжатия при $\mu=0,1$, $\alpha=5^\circ$, $R_0=17,5$ мм, $r_0=11$ мм, $h=6$ мм (кружками показаны экспериментальные данные Ю.Г. Проскурякова): 1 – сталь 20; 2 – сталь 45

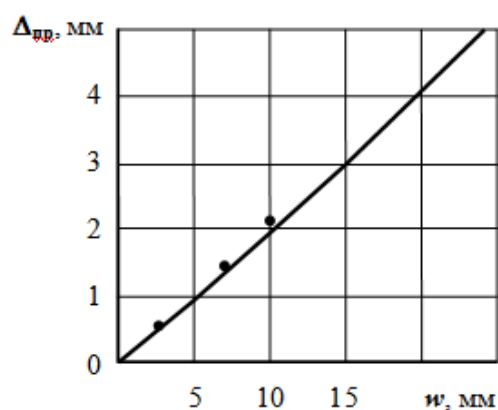


Рис. 3. Зависимость предельного обжатия от толщины получаемой втулки из алюминиевого сплава АВ при $\mu=0,1$, $\alpha=6^\circ$, $h=3$ мм (кружками показаны экспериментальные данные Ю.Г. Проскурякова)

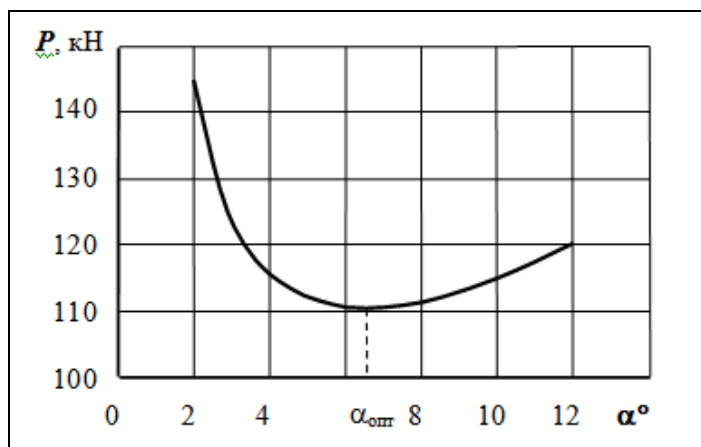


Рис. 4. Теоретическая зависимость деформирующей силы стали У10А от углов инструмента при $\mu=0,1$, $R_0=17,5$ мм, $r_0=11$ мм, $h=6$ мм, $R=17,3$ мм, $r=11,2$ мм (совпадает с экспериментальными данными Ю.Г. Проскурякова)

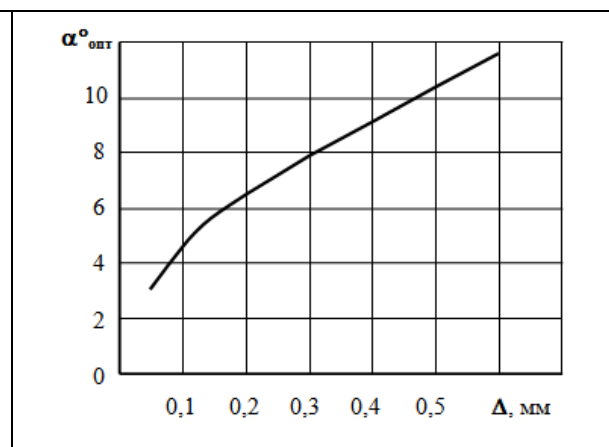


Рис. 5. Зависимость оптимальных углов инструмента от обжатия при $\mu=0,1$, $R_0=17,5$ мм, $r_0=11$ мм (совпадает с экспериментальными данными Ю.Г. Проскурякова)

В результате 213 числовых сравнений расчётных результатов с экспериментальными была подтверждена надёжность количественного учёта выведенными формулами влияния всех значимых факторов на основные характеристики совмещённого процесса редуцирования–дорнования с наибольшим расхождением 5,5%.

Сопоставления расчётных и экспериментальных данных при одинаковых Таблица 1и при различных углах матрицы и дорна – Таблица 2. Типовые экспериментальные образцы показаны на Рисунок 6.

Таблица 1.

Сравнение расчётных и экспериментальных значений силы совмещённого процесса редуцирования–дорнования алюминиевого сплава АВ ($\sigma_{s0}=140$ МПа, $\mu=0,1$, $\alpha=\gamma=12^\circ$, $R=20$ мм, $h=3$ мм)

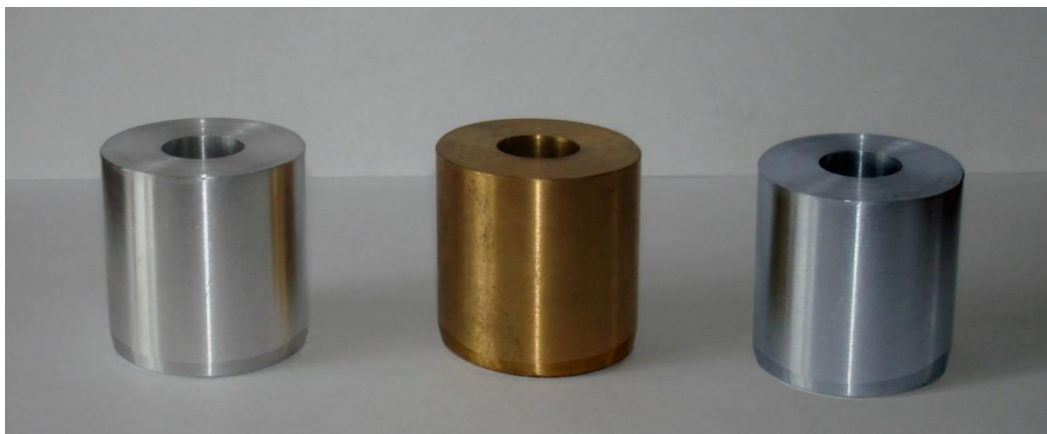
$r, \text{мм}$	$\Delta, \text{мм}$	$R_0, \text{мм}$	$r_0, \text{мм}$	e_i	$\sigma_{sk}, \text{МПа}$	$\sigma_s, \text{МПа}$	$q, \text{МПа}$	$P, \text{кН}$	$P_3, \text{кН}$	$\delta, \%$
10,0	0,2	20,2	9,8	0,045	175	157	35	34	33	4,1
	0,4	20,4	9,6	0,089	192	166	48	49	48	1,3
	0,6	20,6	9,4	0,131	203	171	60	63	61	3,6
	0,8	20,8	9,3	0,171	210	175	72	78	76	3,1
	1,0	21,0	9,0	0,211	216	178	83	94	91	3,5
	1,2	21,2	8,8	0,248	222	181	95	111	107	3,3
	1,4	21,4	8,6	0,285	226	183	106	128	123	3,7
	1,6	21,6	8,4	0,321	231	185	117	145	140	3,8
	1,8	21,8	8,2	0,355	235	187	128	164	158	3,5
	2,0	22,0	8,0	0,389	238	189	138	183	176	3,7
	2,2	22,2	7,8	0,421	242	191	149	202	194	4,0
	2,4	22,4	7,6	0,453	245	193	159	222	214	3,7
11,1	0,2	20,2	10,9	0,051	177	159	37	34	33	2,8
	0,4	20,4	10,7	0,099	195	168	52	49	48	1,7

	0,6	20,6	10,5	0,146	206	173	65	64	63	1,9
	0,8	20,8	10,3	0,191	213	177	78	80	78	2,9
	1,0	21,0	10,1	0,234	220	180	91	97	94	3,2
	1,2	21,2	9,9	0,276	225	183	104	115	111	3,2
	1,4	21,4	9,7	0,316	230	185	116	133	128	3,7
	1,6	21,6	9,5	0,355	235	187	128	152	146	3,9
	1,8	21,8	9,3	0,392	239	189	140	172	166	3,2
	2,0	22,0	9,1	0,429	243	191	152	192	185	3,6
	2,2	22,2	8,9	0,464	247	193	164	213	206	3,2
12,5	0,2	20,2	12,3	0,060	182	161	41	33	32	3,8
	0,4	20,4	12,1	0,117	200	170	58	49	48	2,2
	0,6	20,6	11,9	0,171	210	175	74	66	64	2,4
	0,8	20,8	11,7	0,223	218	179	89	83	81	2,3
	1,0	21,0	11,5	0,273	225	182	104	101	98	3,1
	1,2	21,2	11,3	0,321	231	185	119	120	117	2,8
	1,4	21,4	11,1	0,366	236	188	134	140	136	3,1
	1,6	21,6	10,9	0,410	241	190	148	161	156	3,3
	1,8	21,8	10,7	0,453	245	193	161	183	177	3,3

Таблица 2.

Сравнение расчётных и экспериментальных значений силы совмещённого процесса редуцирования–дорнования при $\alpha \neq \gamma$ ($\mu=0,1$, $R=20$ мм, $h=3$ мм)

Материал и его предел текучести	α°	γ°	R_0 , мм	r_0 , мм	r , мм	ΔR , мм	Δr , мм	e_i	σ_{sk} , МПа	σ_s , МПа	q , МПа	P , кН	P_3 , кН	δ , %
АВ	6	12	21,4	7,2	10,0	1,4	2,8	0,408	241	190	152	194	185	4,7
$\sigma_{s0}=140$ МПа	12	6	23,0	8,5	10,0	3,0	1,5	0,428	243	191	161	231	222	4,0
Л63	6	12	20,8	9,5	11,1	0,8	1,6	0,278	538	369	218	235	227	3,3
$\sigma_{s0}=200$ МПа	12	6	21,6	10,3	11,1	1,6	0,8	0,275	536	368	219	248	240	3,2
12X18H9T	6	12	20,7	11,1	12,5	0,7	1,4	0,287	704	477	293	281	272	3,4
$\sigma_{s0}=250$ МПа	12	6	21,4	11,8	12,5	1,4	0,7	0,284	701	475	293	294	285	2,9



а)

б)

в)



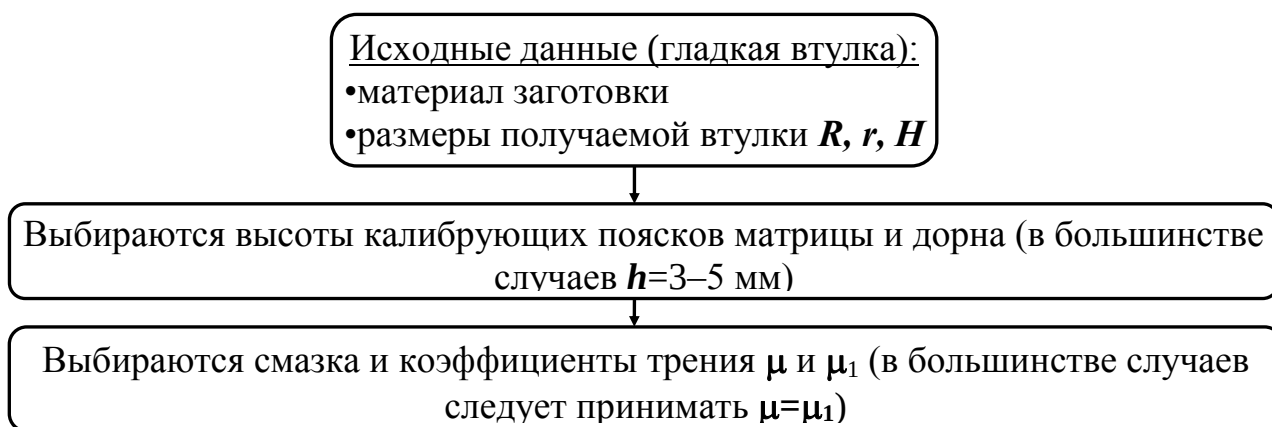
г)

д)

е)

Рис. 6. Исходные заготовки (вверху) с $R_0=21,4$ мм, $r_0=8,6$ мм, $H_0=40$ мм и полученные из них втулки (внизу) с $R=20,0$ мм, $r=10,0$ мм, $H=51,2$ мм: а), г) алюминиевый сплав АВ; б), д) латунь Л63; в), е) сталь 12Х18Н9Т

В четвёртой главе изложена методика расчёта технологических параметров совмещённого процесса редуцирования–дорнования Рисунок 7.



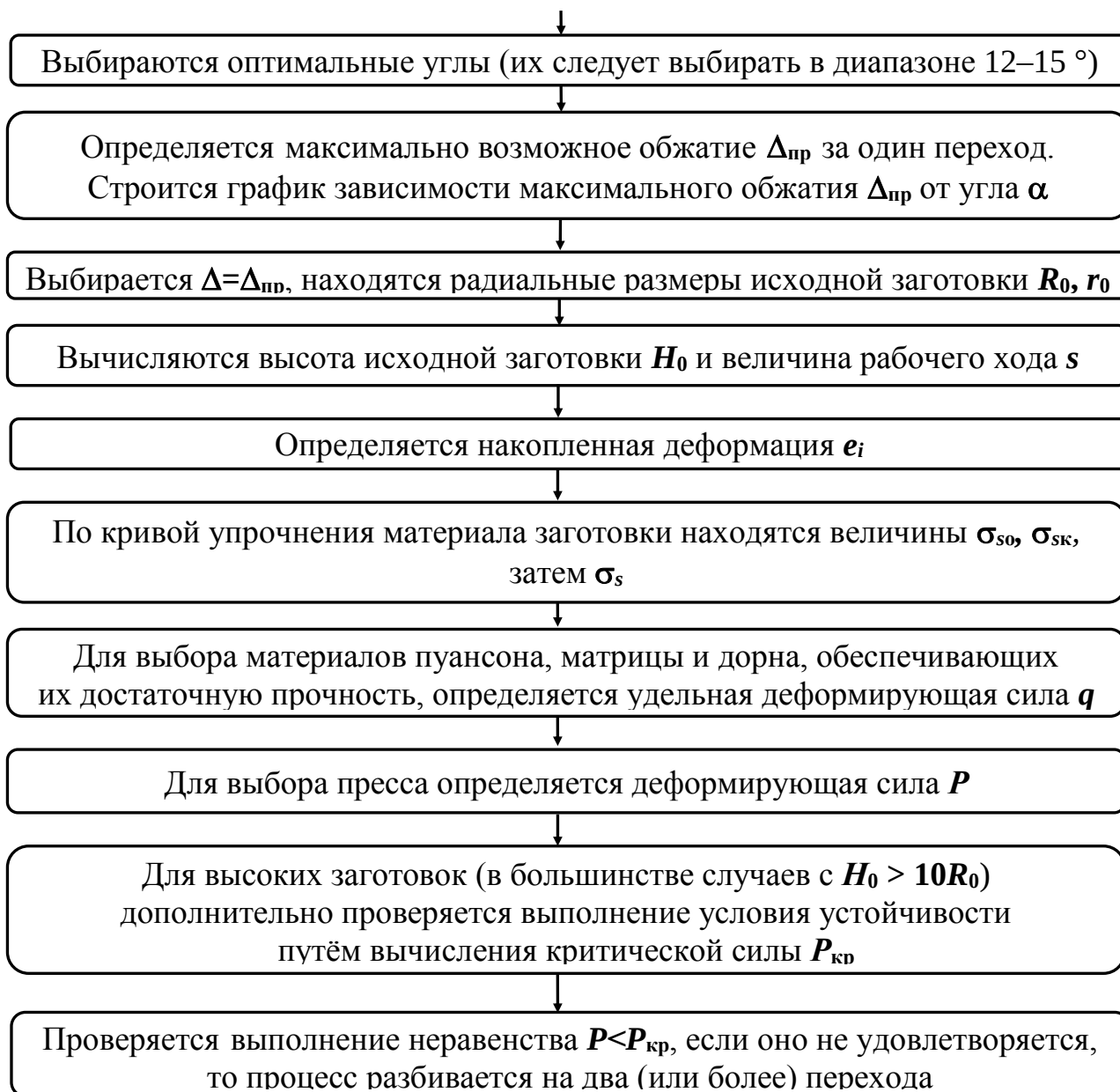


Рис. 7. Методика проектировочного расчёта целью максимального

повышения механических свойств материала втулки за один переход

В зависимости от технического задания, определяющего особенности получения заданного изделия, рассмотрены три возможных практических варианта: методика проверочного расчёта, методика проектировочного расчёта с целью получения заданных механических свойств материала изготавливаемой втулки за минимальное число переходов, а также методика проектировочного расчёта с целью максимального повышения механических свойств материала втулки за один переход (она показана выше в виде блок-схемы).

В пятой главе изложены результаты практического использования новых научных положений диссертационной работы на примере разработки методики проектирования технологического процесса производства втулок ходового вала

изделия УПАЗ-1 (Унифицированного Подвешного Агрегата Заправки) из коррозионно-стойкой стали 12X18H9T. Прочность и износостойкость данной стали невозможно повысить с помощью термообработки. Поэтому единственным эффективным способом повышения прочности, твёрдости и износостойкости данной стали является её холодная пластическая деформация. С учётом дополнительных требований к высокой точности изготовления и малой шероховатости цилиндрических поверхностей промышленное изготовление данных втулок с помощью совмещённого редуцирования–дорнования представляется наиболее целесообразным. Для успешной реализации процесса совмещённого редуцирования–дорнования заданной втулки по разработанной методике были определены оптимальные параметры штамповки, а также спроектирован и изготовлен соответствующий промышленный штамп.

Штамповка пробных партий втулок показала, что применение процесса совмещённого редуцирования–дорнования позволяет значительно улучшить все основные показатели качества данных изделий. Из Таблицы 3 видно, что в результате штамповки показатели чистоты поверхности и размерной точности, а также прочностные показатели значительно возрастают (шероховатость и качество точности с получаемых предварительным точением улучшились до показателей, соответствующих чистовому шлифованию; предел текучести σ_T увеличился почти в 3 раза, а предел прочности σ_B и твёрдость HB примерно в 2 раза). Следует отметить, что твёрдость на наружной и внутренней поверхностях отштампованной втулки одинакова, причём её постоянное значение сохраняется и по всей длине, что свидетельствует о постоянстве механических свойств по объёму втулки.

Таблица 3.

Сравнение основных характеристик заготовки и отштампованной втулки из коррозионно-стойкой стали 12X18H9T

Объект	σ_T , МПа	σ_B , МПа	HB	Квалитет	Шероховатость, Ra
Заготовка	250	510	163	10	10
Готовая втулка	700	950	302	6	0,16–0,32

Средняя экспериментальная величина деформирующей силы $P_s=350$ кН отличается от предварительно вычисленной силы $P=360$ кН на $\delta=2,7\%$, что дополнительно подтверждает высокую точность проектировочных теоретических расчётов.

Хорошей является и точность предсказания предела текучести, который будет иметь материал отштампованной втулки. В расчётах этому пределу текучести соответствует величина конечного напряжения текучести $\sigma_{sk}=722$ МПа, которая отличается от экспериментального значения $\sigma_T=700$ МПа Таблица 3 на величину $\delta=3\%$.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана научно обоснованная методика расчёта технологических параметров совмещённого процесса редуцирования–дорнования,

обеспечивающих получение заданных втулок с повышенными прочностью, размерной точностью и чистотой поверхности при минимальном количестве переходов, меньшей силе деформирования и повышенном коэффициенте использования металла.

2. Результаты решения полной системы классических уравнений теории пластического течения пригодны как для тонкостенных, так и для толстостенных заготовок, и определяют кинематическое, напряжённое и деформированное состояния заготовки с учётом её упрочнения, а также различных коэффициентов трения, углов конусности и высот калибрующих поясков матрицы и дорна.

3. Для успешной реализации процесса редуцирования–дорнования и получения наибольшего формоизменения заготовки за один переход следует соблюдать установленные условия предотвращения потери жёсткости и устойчивости заготовки, а также учитывать, что оптимальные углы матрицы и дорна не являются постоянными, а зависят от коэффициента трения и величины деформации; для повышения производительности путём увеличения обжатия за один переход следует выбирать углы конусности инструмента в диапазоне 12–15°.

4. В результате исследования важнейших физических закономерностей процесса теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что чем большую интенсивность упрочнения проявляет обрабатываемый материал, тем меньшую величину предельного обжатия он допускает. Вследствие этого, величину предельного обжатия за один переход можно повысить путём нормализации или улучшения материала заготовки, однако наиболее эффективные результаты даёт использование заготовок из материалов, подвергнутых предварительной холодной деформации, в частности, волочению.

5. Достоверность и точность полученных формул подтверждены хорошей сходимостью как с многочисленными опытными данными других исследователей, так и с большим количеством собственных экспериментов; эффективность полученных научных результатов подтверждена успешным промышленным опробованием спроектированного по новой методике процесса редуцирования–дорнования втулок ходового вала аэрокосмического изделия, позволившего значительно повысить их эксплуатационные характеристики.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бодарева А. В. О повышении эффективности получения втулок методом совмещения редуцирования и дорнования // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 8. С. 26-30.
2. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещённого процесса редуцирования–дорнования. Постановка задачи // Производство проката. 2014. № 3. С. 41-44.

3. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещённого процесса редуцирования–дорнования. Определение кинематического состояния заготовки // Производство проката. 2014. № 4. С. 38-43.
4. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещённого процесса редуцирования–дорнования. Определение напряжённого состояния заготовки // Производство проката. 2014. № 5. С. 41-46.
5. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещённого процесса редуцирования–дорнования. Определение деформационно-силовых параметров и условий успешной реализации процесса // Производство проката. 2014. № 6. С. 34-47.
6. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещённого процесса редуцирования–дорнования. Сопоставление теоретических результатов с новыми экспериментальными данными // Производство проката. 2014. № 7. С. 34-47.
7. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование совмещённого процесса редуцирования–дорнования. Промышленное опробование научных результатов // Производство проката. 2014. № 8. С. 41-47.
8. Бодарева А. В. Повышение качества изготовления деталей типа втулка комбинированными методами обработки металлов давлением // Научные труды Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. С. 144-146.
9. Бодарева А. В. Повышение эффективности и качества комбинированных методов дорнования и редуцирования // Научные труды IV Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии». М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2012. С. 246-248.
10. Бодарева А. В. Повышение эффективности комбинированных методов дорнования и редуцирования // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Ремонт. Восстановление. Реновация». Уфа: Башкирский ГАУ. 2012. С. 7-9.
11. Бодарева А. В. Совершенствование процесса изготовления деталей типа втулка методом совмещения процессов дорнования и редуцирования // Научные труды конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии». Липецк: Липецкий ГТУ. 2012. С. 38-42.
12. Воронцов А. Л., Бодарева А. В. Исследование напряжённого состояния трубной заготовки при её редуцировании с калибровкой отверстия // Научные труды II международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». Том 2. М.: ИМАШ РАН. 2012. С. 52-58.