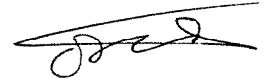


На правах рукописи



Охотин Иван Сергеевич

**ДОРНОВАНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА
В ПОЛЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ
С БОЛЬШИМИ НАТЯГАМИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2010

Работа выполнена на кафедре «Технология автоматизированного машиностроительного производства» Национального исследовательского Томского политехнического университета

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Скворцов В.Ф.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Мазеин П.Г.;

кандидат технических наук,
доцент Брюхов В.В.

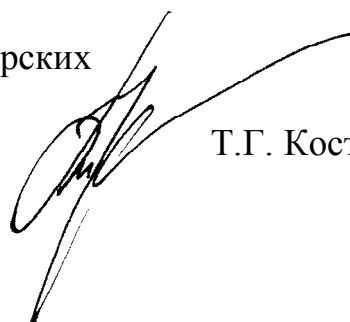
Ведущая организация: Омский государственный
технический университет.

Защита состоится «28» декабря 2010 г. в 17 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.01 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 212.269.01
кандидат технических наук, доцент



Т.Г. Костюченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В машиностроении одной из существенных остается проблема обработки точных (*IT6–IT8*, $Ra = 0,32 \dots 1,25$ мкм) глубоких отверстий малого диаметра ($d = 0,8 \dots 5$ мм; $L/d = 4 \dots 50$, где L – глубина отверстия). Наиболее широко используемые для окончательной обработки таких отверстий развертывание машинными и ружейными развертками, притирка и хонингование являются сложными и трудоемкими. Причем развертывание ружейными развертками и хонингование возможны только при использовании специальных станков, применение которых в условиях единичного и мелкосерийного производства не всегда оказывается эффективным.

Большую группу деталей, содержащих точные глубокие отверстия малого диаметра, образуют полые цилиндры со степенью толстостенности $D/d = 2,8 \dots 7$ (D – их наружный диаметр). К ним относятся корпуса миниатюрных гидроцилиндров, трубки волноводов, сварочные наконечники и др. Анализ литературы показывает, что значительно увеличить производительность обработки отверстий, качество их поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей указанной группы можно, используя дорнование с большими натягами (до $0,1d$ и более), выполняемом после сверления отверстий. Вместе с тем, процесс дорнования глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах, выполняемый с большими натягами, изучен слабо, что затрудняет его практическое применение. Поэтому исследование этого процесса и его технологических возможностей является актуальным.

Цель работы – повышение эффективности обработки точных глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах путем использования дорнования, выполняемого с большими натягами.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования**:

- исследовать закономерности упруго-пластических деформаций толстостенных цилиндров при дорновании глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами;
- установить влияние основных факторов процесса дорнования глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных цилиндрах, осуществляемого с большими натягами, на деформирующие усилия и контактные давления;
- установить особенности формирования параметров точности, шероховатости поверхности, деформационного упрочнения и остаточных напряжений в полых толстостенных цилиндрах при дорновании глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами и выработать рекомендации по выбору его режимов;
- усовершенствовать конструкции устройств для дорнования глубоких отверстий малого диаметра, обеспечив повышение их надежности, производительности и универсальности.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов. В работе использовались основные положения теории упругости и пластичности,

теоретической механики, технологии машиностроения, теории вероятностей и математической статистики. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных условиях с использованием современных аттестованных приборов и аппаратуры. Обработка экспериментальных данных и аналитические исследования выполнялись на ПК. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена корректным использованием известных научных положений и методов, а также подтверждена удовлетворительным совпадением результатов экспериментальных и теоретических исследований и данными производственных испытаний.

На защиту выносятся:

- закономерности упруго-пластических деформаций толстостенных цилиндров при дорновании глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами;
- результаты экспериментальных исследований параметров контактного взаимодействия инструмента с толстостенными цилиндрами при дорновании глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами;
- закономерности и физические модели формирования параметров точности и качества поверхностного слоя при дорновании глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных цилиндрах с большими натягами;
- математические зависимости для расчета усилия дорнования глубоких отверстий малого диаметра, а также возникающих после его выполнения усадки отверстий и приращения наружного диаметра толстостенных цилиндров;
- конструкция устройства для дорнования глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных цилиндрах.

Научная новизна состоит в:

- установленных закономерностях упруго-пластических деформаций полых толстостенных цилиндров при дорновании глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами;
- выявленных закономерностях контактного взаимодействия инструмента с полыми толстостенными цилиндрами при дорновании глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами;
- установленных особенностях формирования параметров точности и качества поверхностного слоя при дорновании глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами.

Практическая ценность заключается в:

- конструкции устройства для дорнования глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах;
- предложенном способе базирования полых толстостенных цилиндров при дорновании глубоких отверстий малого диаметра;
- рекомендациях по выбору режимов и условий дорнования глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах из углеродистых и легированных сталей;
- разработанном технологическом процессе изготовления корпуса миниатюрного гидроцилиндра, включающем операции дорнования глубокого

отверстия с большими натягами и позволяющем обеспечить высокие эксплуатационные свойства этих деталей.

Реализация результатов работы. Разработанный технологический процесс изготовления корпуса миниатюрного гидроцилиндра, включающий операции дорнования глубокого отверстия с большими натягами, и соответствующая технологическая оснастка внедрены в производство в ЗАО «Наука и серийный выпуск» (г. Томск). Результаты работы также используются в учебном процессе – при чтении лекций по дисциплине «Технология машиностроения» в Томском политехническом университете.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на научных семинарах кафедры «Технология автоматизированного машиностроительного производства» Томского политехнического университета в период с 2005 по 2010 г, а также были доложены на следующих конференциях: XII, XIII и XIV Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2006, 2007, 2008), III и IV Международных научно-технических конференциях «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2006, 2008), Международной молодежной научной конференции «XIV Туполевские чтения» (Казань, 2006), 6-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2008), 6-й Международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности» (Брянск, 2008), Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы в технологии машиностроения» (Новосибирск, 2009), III и IV Международных научно-технических конференциях «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» (Тюмень, 2005, 2008).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, получено 3 патента на изобретения.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и заключения, изложенных на 149 страницах машинописного текста, содержит 82 рисунка, 18 таблиц, список литературы, включающий 123 наименования, 3 приложения. Общий объем диссертации составляет 171 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, указана ее цель, кратко изложено содержание, сформулированы научная новизна и практическая ценность.

В первой главе представлен анализ проблемы обработки точных глубоких отверстий малого диаметра. Показано, что значительно повысить эффективность обработки этих отверстий можно, используя дорнование.

На основе работ А.Н. Исаева, А.М. Кузнецова, П.Г. Мазеина, А.П. Моргунова, В.П. Монченко, Ю.Г. Проскурякова, А.М. Розенберга, О.А. Розенберга, Н.С. Сивцева, Ю.А. Цеханова, Ю.Г. Шнейдера, И.И. Янченко и других исследователей выполнен анализ основных закономерностей и технологических возможно-

стей процесса дорнования, рассмотрено его применение для обработки глубоких отверстий малого диаметра. Проведенный анализ позволяет констатировать следующее.

Дорнование глубоких отверстий малого диаметра (с $d = 1 \dots 3$ мм), выполняемое с использованием больших суммарных натягов (до $0,1d$) твердосплавными дорнами, является простым и производительным методом их отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающим высокую точность и качество поверхностного слоя отверстий, в том числе полученных сверлением спиральными сверлами.

Большую группу деталей, содержащих точные глубокие отверстия малого диаметра ($d = 0,8 \dots 5$ мм), образуют полые цилиндры различной степени толстостенности ($D/d = 2,8 \dots 7$) с относительной высотой (глубиной отверстия) $L/d = 4 \dots 50$.

Процесс дорнования отверстий с большими суммарными натягами в этих деталях изучен слабо, что сдерживает его практическое применение. В литературе отсутствуют сведения о влиянии степени толстостенности полых цилиндров на усилия дорнования, контактные давления, закономерности их упруго-пластического деформирования, а также параметры точности и качества поверхностного слоя отверстий. Существующие представления об этом влиянии, в соответствии с которыми считается, что при $D/d \geq 3$ усилия дорнования (и контактные давления) сохраняются постоянными, наружная область деталей независимо от натяга дорнования всегда находится в упругом состоянии, а вытесняемый из отверстия металл в основном смещается в виде наплывов на торцы деталей, как показали предварительные эксперименты, нельзя распространять на область больших натягов дорнования. Вполне очевидно, что влияние указанного геометрического параметра на процесс дорнования отверстий нужно рассматривать во взаимосвязи с другими геометрическими параметрами полых цилиндров – диаметром отверстий d и относительной высотой L/d , а также режимами дорнования, его схемами и механическими свойствами металла деталей. Для обоснованного проектирования операции дорнования глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах нужно располагать математическими зависимостями для оценки усилий дорнования, усадки отверстий и деформаций наружной поверхности цилиндров, которые в настоящее время отсутствуют.

Дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых цилиндрах возможно только при использовании специальных приспособлений, существующие конструкции которых имеют ряд существенных недостатков. Поэтому важным является совершенствование конструкций этих приспособлений с целью повышения их надежности, производительности и универсальности. Не менее важным остается и создание эффективных способов установки полых цилиндров в зоне обработки указанных приспособлений.

На основании вышеизложенного сформулированы задачи исследования.

Во второй главе изложена методика, описаны устройства, приборы и аппаратура для экспериментального исследования процесса дорнования глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах и его технологических возможностей, а также дана методика обработки результатов экспериментов.

Исследования проводили на образцах в виде полых толстостенных цилиндров из сталей 20 (НВ 1300 МПа), 45 (НВ 1700 МПа), X12Ф1 (НВ 2070 МПа), X12МФ (НВ 2000 МПа), а также на заготовках корпусов миниатюрных гидроцилиндров из стали X12М (НВ 2000 МПа). Диаметр отверстий цилиндров составлял: 2; 2,7; и 5 мм, их относительная глубина – 2...18, степень толстостенности – 2,3...11. (Размеры образцов до дорнования обозначены ниже соответственно d_0 , D_0 , L_0).

Дорнование отверстий выполняли однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов равными 6° . Относительные натяги дорнования (a/d_0 , $\Sigma a/d_0$) достигали 0,19, число циклов дорнования изменялось от 1 до 3. Дорнование проводили со скоростью 0,05 и 0,5 м/мин по схемам сжатия и растяжения (см. рис. 1) с помощью специально разработанного приспособления, позволяющего при минимальных переналадках осуществлять обработку отверстий различного диаметра и глубины. Одной из особенностей этого приспособления является размещение дорна с натягом в направляющей втулке с покрытием из фторопласта, что обеспечивает длительное сохранение натяга. Другой его особенностью является наличие индикаторного устройства для выверки положения образца относительно дорна. В совокупности все это исключает перекосы и изгиб дорна при входе в отверстие и, тем самым, обеспечивает высокую надежность приспособления и точность обработки отверстий. В качестве смазочных материалов при дорновании отверстий использовали: жидкость МР-7 (образцы из сталей 20 и 45) и ее смесь с дисульфидом молибдена (образцы из сталей X12Ф1 и X12МФ).

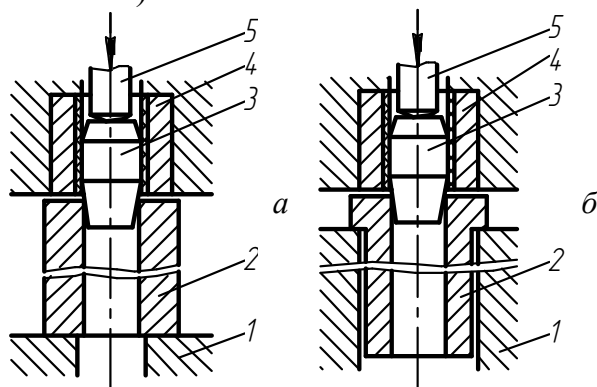


Рис. 1. Схемы дорнования отверстий: а – сжатия; б – растяжения. 1 – опора; 2 – образец; 3 – дорн; 4 – направляющая втулка с покрытием из фторопласта; 5 – толкатель дорна

Измерения диаметров отверстий и погрешностей их формы после сверления выполняли нутромером фирмы «Carl Zeiss Jena» (Германия) с ценой деления 0,002 мм, а после дорнования – компаратором с перффлектометром фирмы «Leitz» (Германия) с ценой деления 0,0002 мм. Диаметр наружной поверхности и погрешности ее формы измеряли на вертикальном оптиметре модели ИКВ с ценой деления 0,001 мм. Изменение высоты образцов находили по изменению расстояния между нанесенными на их наружную поверхность отпечатками конического индентора. Измерение размеров наплывов металла на торцах обработанных дорнованием образцов производили при помощи приспособления, состоящего из микрометрического и двухповоротного столов и закрепленной на стойке измерительной головки с ценой деления 0,002 мм. Параметры наплывов определяли не только после окончания дорнования, но и по мере входа и выхода дорна из отверстия.

Измерение усилий и определение средних контактных давлений проводили при дорновании отверстий на испытательных машинах УМЭ-10ТМ и ИР 5057-50 при скорости 0,05 м/мин. Средние контактные давления на рабочем конусе дорна определяли по формуле

$$q_N = \frac{P}{\pi d_c L_\phi (\sin \alpha + f \cos \alpha)},$$

где: P – усилие дорнования; d_c – диаметр рабочего конуса посередине фактической ширины контакта; L_ϕ – фактическая ширина контакта рабочего конуса с образцом; α – половина угла рабочего конуса; f – коэффициент трения. При определении контактных давлений использовали дорны из стали ШХ15 (HRC_{Σ} 62...64). Это позволяло (при дорновании отверстий в стальных образцах) находить L_ϕ по ширине естественного следа контакта на рабочем конусе дорна. Значение коэффициента трения f принимали по литературным данным. Параметры шероховатости поверхности отверстий измеряли на профилометре-профилографе «Talysurf 5-120» (Великобритания).

Деформационное упрочнение образцов оценивали путем измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузке на пирамиду 1,96 Н. Остаточные напряжения в обработанных дорнованием образцах ($d = 5$ мм) определяли методом Г. Закса с использованием формул И.А. Биргера. Последовательное удаление слоев металла толщиной 0,8...1,0 мм с их внутренней поверхности выполняли на вырезном электроэрозионном станке за два перехода. Возникающие при этом деформации находили по результатам измерений наружного диаметра и высоты образцов, которые проводили с использованием специальных приборов, оснащенных микрокатером с ценой деления 0,0005 мм.

Обработку экспериментальных данных проводили в программах Microsoft Excel 2007 и DynoWare 2.4.1.6. Точность отверстий и наружных поверхностей образцов оценивали статистическими методами. Для установления зависимостей между их погрешностями после различных обработок использовали линейный корреляционный анализ. Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли в пакете Statistica 7.0.

В третьей главе представлены результаты исследований контактного взаимодействия инструмента с полыми толстостенными цилиндрами и их упруго-пластических деформаций при дорновании глубоких отверстий малого диаметра.

Установлено, что увеличение степени толстостенности полых цилиндров (при $D_0/d_0 \geq 3$) приводит при больших натягах дорнования к очень существенному возрастанию усилий, которые оказываются тем больше, чем больше натяг дорнования (см. рис. 2). При этом прирост усилий постепенно замедляется. Как видно из рис. 2, при одноцикловом дорновании отверстий ($d_0 = 2,16$ мм) в цилиндрах из стали 20 с увеличением D_0/d_0 от 3 до 6,5 при натяге $a/d_0 = 0,046$ усилие возрастает в 1,7 раза, а при натягах a/d_0 , равных 0,096 и 0,15 – более чем в 2 раза. Подобные закономерности имеют место и при многоцикловом дорновании с большими натягами.

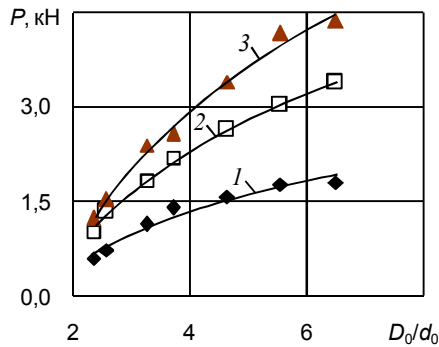


Рис. 2. Зависимости усилий при одноцикловом дорновании отверстий ($d_0 = 2,16$ мм) в полых цилиндрах из стали 20 от степени их толстостенности: 1 – $a/d_0 = 0,047$; 2 – $a/d_0 = 0,097$; 3 – $a/d_0 = 0,15$

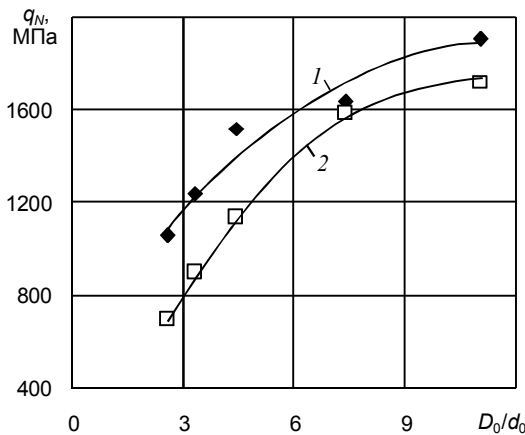


Рис. 3. Зависимости средних контактных давлений при одноцикловом дорновании отверстий от степени толстостенности полых цилиндров из стали 45 с $d_0 = 2,7$ мм при натягах: 1 – $a/d_0 = 0,048$; 2 – $a/d_0 = 0,11$

Эксперименты показали, что столь же существенно, как и усилия дорнования с увеличением D_0/d_0 повышаются средние контактные давления на рабочем конусе инструмента (см. рис. 3). При изменении D_0/d_0 цилиндров из стали 45 с $d_0 = 2,7$ мм от 3 до 11 они возрастают в 1,6...2,2 раза и достигают значений 1900 МПа. Более высокие контактные давления имеют место при меньшем натяге одноциклового дорнования. Это объясняется тем, что с уменьшением натяга быстро уменьшается фактическая ширина контакта и значительно медленнее – усилие дорнования.

Как будет показано ниже, дорнование глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах целесообразно выполнять не менее, чем за три цикла, используя при первом цикле натяг, составляющий (70...90)% от суммарного натяга. При этом наибольшее усилие возникает при первом цикле дорнования. Для определения этого усилия (кН) при дорновании отверстий в цилиндрах их конструктивных углеродистых сталей по схеме сжатия получена следующая зависимость

$$P = 0,045(HB)^{0,793} a^{0,674} d_0^{0,85} \ln \frac{D_0}{d_0},$$

где: HB – твердость стали по Бринеллю; a – натяг дорнования, мм; d_0 – диаметр от-

верстия, мм. Эта зависимость справедлива при использовании жидкости МР-7, твердости сталей HB 130...170, диаметрах отверстий от 2 до 5 мм, натяге от 0,1 мм до 0,3 мм, степени толстостенности цилиндров от 2,3 до 9,5.

В результате исследований упруго-пластических деформаций полых толстостенных цилиндров при дорновании глубоких отверстий малого диаметра установлено следующее.

Образование наплывов металла на торцах цилиндров происходит при входе и выходе дорна из отверстия. Наибольшую высоту наплывы имеют у его образующей (см. рис. 4), причем на выходном торце эта высота (и объем наплывов) оказываются в несколько раз больше, чем на входном. По мере входа дорна в отверстие размеры и объем наплывов (на входном торце) изменяются не монотонно – сначала возрастают, а затем снижаются. При выходе дорна из отверстия размеры и объем наплывов на выходном торце цилиндров монотонно увеличиваются.

Расстояния от торцов цилиндров, на которых происходит формирование наплывов, почти не зависит от натяга дорнования и достигает $(2...2,5)d_0$. Если высота цилиндров оказывается меньше $(4...5)d_0$, то образование наплывов на входном и выходном торцах идет одновременно. Их размеры и объем возрастают с увеличением степени толстостенности цилиндров, натягов дорнования, числа его циклов и диаметра отверстия и почти не зависят от глубины отверстия (при $L_0/d_0 \geq 2$). Поэтому отношение объема наплывов на обоих торцах V_δ к объему металла V_d , вытесненного из отверстия в процессе дорнования, изменяется обратно пропорционально величине L_0/d_0 (см. рис. 5). Если, например, для обработанных с натягом $a/d_0 = 0,15$ цилиндров из стали 20 с $D_0/d_0 = 4,6$ при $L_0/d_0 = 2$ это отношение составляет 0,37, то при $L_0/d_0 = 18$ оно падает до 0,05, т. е.

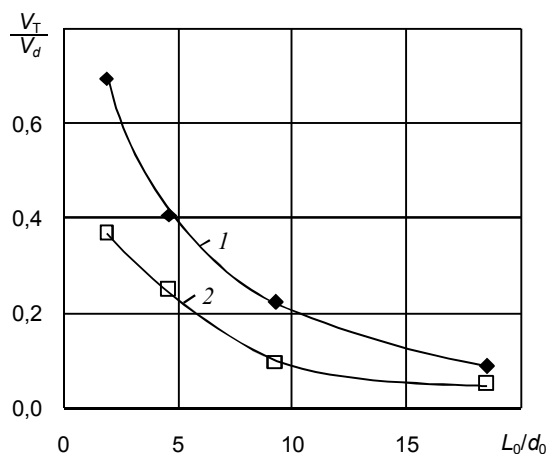


Рис. 5. Зависимости отношения объема металла, вытесненного на торцы цилиндров, к объему металла, вытесненного при одноцикловом дорновании из отверстия, от его относительной глубины: 1 – $a/d_0 = 0,047$; 2 – $a/d_0 = 0,15$.

Сталь 20, $d_0 = 2,16$ мм, $D_0/d_0 = 4,6$, схема сжатия

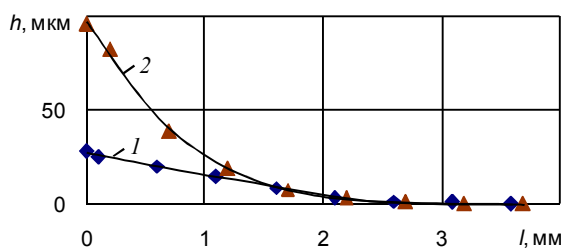


Рис. 4. Зависимости высоты наплывов металла на входном (1) и выходном (2) торцах цилиндров с $D_0/d_0 = 4,6$ после одноциклового дорнования отверстия от расстояния до его образующей. Сталь 20, $d_0 = 2,16$ мм, $a/d_0 = 0,047$, схема сжатия

в этом случае подавляющая часть вытесняемого из отверстия металла смещается на наружную поверхность цилиндров.

При малых натягах ($a/d_0 = 0,011$) процесс дорнования отверстий в цилиндрах из исследованных сталей с $D_0/d_0 \geq 3$ носит полупругий характер – окружная остаточная деформация на их наружной поверхности не превышает 0,0005 и является упругой. С увеличением натяга дорнования (a/d_0 , $\Sigma a/d$) эта деформация практически пропорционально возрастает и все более толстостенные цилиндры (вплоть до имеющих $D_0/d_0 = 7,5$) претерпевают сквозные

пластические деформации. Сказанное подтверждают результаты экспериментов, показанные на рис. 6. Если при натяге $a/d_0 = 0,047$ окружная остаточная деформация на наружной поверхности цилиндров из стали 20 с $D_0/d_0 = 6,5$ составляет 0,0006, т. е. является упругой, то при натяге $a/d_0 = 0,15$ она возрастает до 0,003 и становится упруго-пластической. Эта деформация увеличивается обратно пропорционально квадрату степени толстостенности цилиндров и, например, при $D_0/d_0 = 3$ и натяге $a/d_0 = 0,15$ достигает 0,02, т. е. является весьма существенной и ее необходимо учитывать при проектировании операций дорнования.

Таким образом, существующие представления о влиянии степени толстостенности цилиндров (при $D_0/d_0 \geq 3$) на процесс дорнования отверстий нельзя распространять на область больших натягов.

Установлено, что дорнование с большими натягами глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных цилиндрах сопровождается образованием у их торцов некоторых погрешностей формы наружной поверхности. Предложена физическая модель образования этих погрешностей при дорновании по схемам сжатия и растяжения.

Путем обработки результатов экспериментов получены зависимости для расчета усадки отверстий и наружного диаметра обработанных дорнованием цилиндров.

Усадка (мм) при одноцикловом дорновании может быть определена по формуле

$$\Delta y = 1 \cdot 10^{-5} HB \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^{1,25} d_0 \left(\frac{a}{d_0} \right)^{0,42}.$$

Она справедлива для условий: $D_0/d_0 = 3 \dots 9,5$; $HB 130 \dots 170$; $d_0 = 2 \dots 5$ мм; $a/d_0 = 0,03 \dots 0,1$.

Зависимости для расчета наружного диаметра имеют вид:

- для цилиндров из стали 20

$$D = D_0 + d - d_0 - 1,366 t_0 \frac{a}{d_0} \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^{-0,783};$$

- для цилиндров из стали 45

$$D = D_0 + d - d_0 - 1,820 t_0 \frac{a}{d_0} \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^{-0,978},$$

где t_0 – толщина стенки цилиндра до дорнования. Эти зависимости справедливы соответственно при: $D_0/d_0 = 2,3 \dots 6,5$ и $D_0/d_0 = 2,5 \dots 9,5$, $d_0 = 2 \dots 5$ мм и a до 0,3 мм.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений, деформационного упрочнения и шероховатости поверхности при дорновании глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами.

Установлено, что при этом методе обработки отверстий в толстостенных цилиндрах формируются значительные окружные, радиальные и осевые остаточные напряжения (см. рис. 7). Вблизи отверстия окружные и осевые остаточные

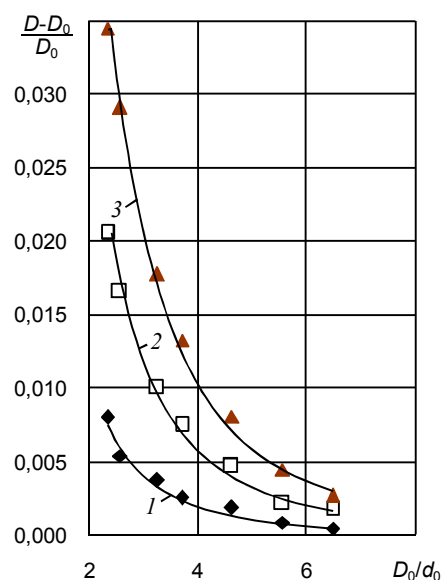


Рис. 6. Зависимости окружной остаточной деформации на наружной поверхности обработанных одноцикловым дорнованием цилиндров от степени их толстостенности: 1 – $a/d_0 = 0,047$; 2 – $a/d_0 = 0,097$; 3 – $a/d_0 = 0,15$.

Сталь 20, $d_0 = 2,16$ мм, схема сжатия

напряжения сжимающие, в наружной области цилиндров – растягивающие. Радиальные остаточные напряжения равны нулю на поверхности отверстия и наружной поверхности цилиндров и являются сжимающими в остальной их области. Наибольшими по абсолютной величине являются окружные остаточные напряжения, которые около отверстия могут быть близки к пределу текучести материала цилиндров и даже превышать его. Значительно меньшими оказываются радиальные и еще меньшими – осевые остаточные напряжения. С увеличением натяга и числа циклов дорнования остаточные напряжения возрастают. Наименьшие остаточные напряжения возникают при дорновании отверстий в полуупругом режиме. Увеличение степени толстостенности цилиндров приводит к повышению всех компонентов остаточных напряжений (см. рис. 7). При этом особенно сильно увеличиваются осевые остаточные напряжения.

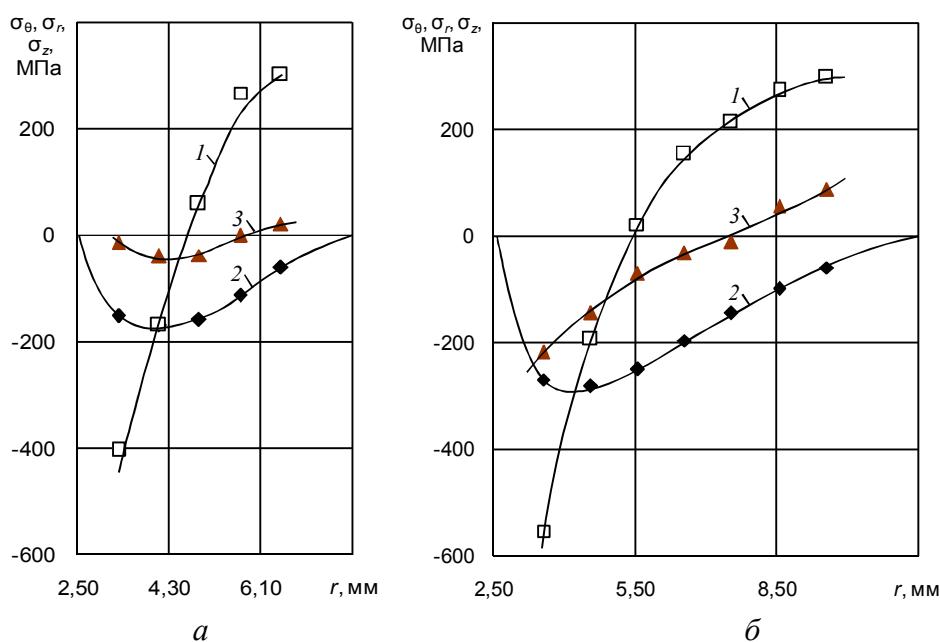


Рис. 7. Эпюры окружных (1), радиальных (2) и осевых (3) остаточных напряжений в цилиндрах из стали X12Ф1 с $D_0/d_0 = 3,2$ (а) и $D_0/d_0 = 4,6$ (б) после дорнования отверстий ($d = 5$ мм) с суммарным натягом $\Sigma a = 0,28$ мм (натяг при первом цикле $a_1 = 0,265$ мм, при втором – $a_2 = 0,015$ мм)

Деформационное упрочнение полых толстостенных цилиндров при дорновании глубоких отверстий малого диаметра возрастает с увеличением натяга и числа циклов обработки, степени толстостенности цилиндров и упрочняемости их материала. По мере увеличения натяга дорнования (a/d_0 , $\Sigma a/d_0$) все более толстостенные цилиндры (вплоть до имеющих $D_0/d_0 = 7$) получают сквозное упрочнение. Если, например (см. рис. 8), при одноцикловом дорновании отверстий ($d_0 = 2,16$ мм) в цилиндрах из стали 20 с $D_0/d_0 = 6,5$ при натяге $a/d_0 = 0,047$ толщина упрочненного слоя составляет около 3 мм, то при его увеличении до 0,15 упрочнение распространяется на всё поперечное сечение цилиндров. Показано, что при дорновании отверстий в полуупругом режиме толщина упрочненного слоя в цилиндрах из материала с линейным упрочнением не зависит от степени их толстостенности и может быть найдена по предложенной в работе зависимости.

Шероховатость поверхности обработанных дорнованием отверстий по мере увеличения степени толстостенности цилиндров (при $D_0/d_0 \geq 3$) значительно уменьшается, что обусловлено ростом контактных давлений. При трехцикловом дорновании (с малыми натягами на втором и третьем циклах) параметр шероховатости поверхности Ra отверстий в цилиндрах из исследованных сталей с $D_0/d_0 = 3 \dots 7$ может быть снижен с $2,5 \dots 5$ мкм до $0,32 \dots 1,25$ мкм.

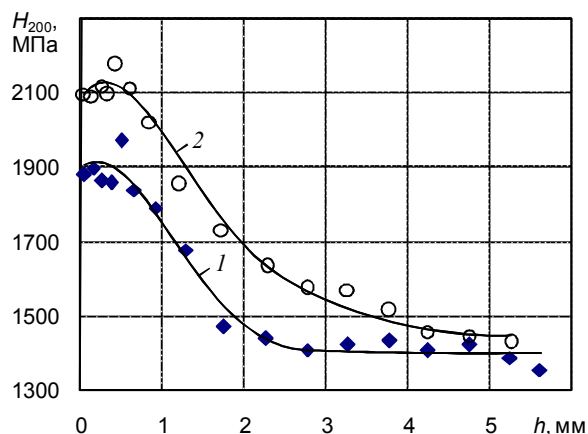


Рис. 8. Зависимости микротвердости обработанных одноцикловым дорнованием толстостенных цилиндров из стали 20 с $d_0 = 2,16$ мм и $D_0/d_0 = 6,5$ от расстояния от поверхности отверстия: 1 – $a/d_0 = 0,047$; 2 – $a/d_0 = 0,15$

В пятой главе приведены результаты исследования точности глубоких отверстий малого диаметра в толстостенных цилиндрах, обрабатываемых дорнованием с большими натягами, а также описано внедрение результатов работы в производство.

На основе статистических исследований показано, что для обеспечения наиболее высокой точности отверстий дорнование с большими натягами необходимо выполнять не менее, чем за три цикла, используя на последних циклах малые натяги ($a \leq 0,01d_0$). При этом точность глубоких отверстий малого диаметра (без учета отклонений их осей от прямолинейности) может быть повышена с $IT13$ – $IT14$ (после сверления спиральными сверлами) до $IT7$ (при $D_0/d_0 \leq 5$) и до $IT8$ (при $D_0/d_0 = 7$).

Установлено, что наблюдаемое с увеличением степени толстостенности цилиндров снижение точности обработанных дорнованием отверстий обусловлено воздействием сформированных в них осевых остаточных напряжений. Последние, являясь сжимающими в прилегающей к отверстию области цилиндра, постепенно затухают при приближении к его торцам. Следовательно, в соответствии с обобщенным законом Гука у торцов окружная остаточная деформация на поверхности отверстия и его диаметр будут меньше, чем в остальной части цилиндра, т. е. отверстие будет иметь отклонение профиля продольного сечения. Так как с увеличением D_0/d_0 цилиндров осевые остаточные напряжения возрастают, то указанные отклонения при этом становятся больше, а точность отверстий – ниже.

На основе выполненных исследований разработан и внедрен в производство в ЗАО «Наука и серийный выпуск» (г. Томск) новый технологический процесс изготовления корпуса миниатюрного гидроцилиндра ($d = 5^{+0,01}$ мм, $D/d \approx 3$, $L/d = 12$)

из стали Х12М, включающий операции дорнования отверстия с большими натягами. Для выполнения этих операций с использованием патентов РФ №№ 2383423, 2288831, 2356706 разработано приспособление к гидравлическому прессу. Разработанный технологический процесс является экономичным и обеспечивает высокие эксплуатационные свойства указанной детали.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Дорнование с большими (от $0,03$ до $0,19d_0$) суммарными натягами, выполняемое твердосплавными инструментами, является простым и производительным методом отделочно-упрочняющей обработки глубоких отверстий малого диаметра ($d_0 = 2 \dots 5$ мм) в полых толстостенных цилиндрах ($D_0/d_0 = 3 \dots 7$), позволяющим обеспечить высокую точность отверстий и качество их поверхностного слоя.

2. Установлено, что при больших натягах очень существенное влияние на процесс дорнования, выполняемый по схемам сжатия и растяжения, и его выходные характеристики оказывает степень толстостенности полых цилиндров (при $D_0/d_0 \geq 3$). С увеличением этого параметра полых цилиндров значительно возрастают деформирующие усилия, контактные давления и усадка отверстий, улучшаются показатели качества их поверхностного слоя, несколько снижается точность формы отверстий.

3. Исследования показали, что при повышении натяга дорнования (в указанном диапазоне) все более толстостенные цилиндры (вплоть до имеющих $D_0/d_0 = 7,5$), изготовленные из углеродистых и легированных сталей с $\sigma_{0,2} \leq 450$ МПа, претерпевают сквозные пластические деформации. Выявлено, что формирование наплывов на торцах заготовок указанного типа происходит при входе и выходе дорна из отверстия. Объем (и размеры) наплывов возрастают с увеличением степени толстостенности полых цилиндров, диаметра отверстий, натяга дорнования и числа его циклов и практически не зависят от глубины отверстий при $L_0/d_0 \geq 2$. При $L_0/d_0 \geq 10$ подавляющая часть металла, вытесняемого из обрабатываемого дорнованием отверстия, смещается на наружную поверхность этих заготовок.

4. Показано, что деформационное упрочнение поверхностного слоя отверстий является тем большим, чем больше натяг дорнования, число его циклов, степень толстостенности полых цилиндров и упрочняемость их материала. При больших натягах даже очень толстостенные цилиндры (с $D_0/d_0 = 7$) из указанных выше сталей получают сквозное упрочнение.

5. Установлено, что при дорновании глубоких отверстий малого диаметра, выполняемого с большими натягами, в полых толстостенных цилиндрах формируются значительные окружные, радиальные и осевые остаточные напряжения. Около отверстия эти напряжения являются сжимающими. Увеличение степени толстостенности полых цилиндров вызывает существенное повышение всех компонентов остаточных напряжений. При этом особенно сильно возрастают осевые остаточные напряжения.

6. Дорнование отверстий с большими натягами в заготовках рассматриваемого типа для обеспечения наиболее высокой точности и качества поверхностного слоя

необходимо выполнять не менее, чем за три цикла, используя на последних циклах малые натяги ($a \leq 0,01d_0$). При этом точность отверстий (без учета отклонений их оси от прямолинейности) может быть повышена с $IT13$ – $IT14$ до $IT7$ (при $D_0/d_0 \leq 5$) и до $IT8$ (при $D_0/d_0 = 7$), а шероховатость поверхности уменьшена с $Ra = 2,5 \dots 5$ мкм до $Ra = 0,32 \dots 1,25$ мкм.

7. Предложены физические модели образования локальных отклонений формы отверстий и наружных поверхностей обрабатываемых дорнованием с большими натягами толстостенных цилиндров у их торцов. Показано, что в целом точность их наружной поверхности при дорновании снижается незначительно, однако среднее приращение диаметра этой поверхности может быть существенным.

8. Получены математические зависимости для расчета деформирующих усилий, усадки отверстий и наружного диаметра полых толстостенных цилиндров после дорнования, которые могут быть использованы при проектировании операций дорнования глубоких отверстий малого диаметра в этих заготовках.

9. На основе результатов исследований разработан и внедрен в производство в ЗАО «Наука и серийный выпуск» (г. Томск) новый технологический процесс изготовления корпусов миниатюрных гидроцилиндров, включающий операции дорнования с большими натягами глубокого отверстия малого диаметра ($d = 5^{+0,01}$ мм, $L/d = 12$) и позволяющий обеспечить высокие эксплуатационные свойства этих деталей. Для выполнения этих операций разработаны конструкции твердосплавных дорнов и специального высокопроизводительного приспособления к гидравлическому прессу.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. О влиянии геометрических параметров заготовок на процесс дорнования // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 55–59.
2. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Особенности процесса дорнования отверстий малого диаметра в толстостенных втулках, выполняемого с большими натягами // Обработка металлов. – 2006. – № 4. – С. 15–17.
3. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Влияние степени толстостенности заготовок на процесс дорнования отверстий, выполняемый с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – Томск: ТПУ, 2009, Т. 314, – № 2. – С. 62–65.
4. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Дорнование с большими натягами глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с их сжатием и растяжением // Обработка металлов. – 2007. – № 3. – С. 5–7.
5. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – Томск: ТПУ, 2010, Т. 316, – № 2. – С. 24–27.

6. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Точность при дорновании с большими натягами отверстий малого диаметра в толстостенных втулках // Обработка металлов. – 2007. – № 4. – С. 15–17.

7. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Закономерности процессов базирования заготовок, осуществляемых инструментом при свободном дорновании отверстий // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 7. – С. 63–70.

Статьи в других изданиях, патенты:

8. Арляпов А.Ю., Ватолин А.В., Охотин И.С., Скворцов В.Ф. Универсальное приспособление для дорнования глубоких отверстий малого диаметра // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: материалы IV международной научно-технической конференции – Тюмень, ТюмГНГУ, 2008, Т. 1. – С. 6–8.

9. Охотин И.С. Исследование точности отверстий малого диаметра в толстостенных заготовках, обрабатываемых дорнованием с большими натягами // Материалы международной молодежной научной конференции «XIV Туполевские чтения». – Казань: КГТУ, 2006. – С. 227–228.

10. Охотин И.С. Образование наплывов на торцах полых толстостенных цилиндров с отверстиями малого диаметра, обрабатываемыми дорнованием с большими натягами // Сб.тр.14-ой международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: ТПУ, 2008. – С. 298–300.

11. Охотин И.С., Ватолин А.В. Исследование влияния степени толстостенности заготовок на точность отверстий, обрабатываемых дорнованием // Труды IV международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». – Томск: ТПУ, 2008. – С. 545–547.

12. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование с большими натягами как метод обработки глубоких отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах // Материалы 6-й международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности». – Брянск: БГТУ, 2008. – С. 332–333.

13. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Упрочнение поверхностного слоя при дорновании отверстий малого диаметра в толстостенных заготовках // Сб.тр.3^{ей} международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». – Томск: ТПУ, 2006.

14. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С., Жук В.С. Способ базирования заготовки при дорновании. Патент РФ № 2356706. Опубл. 27.05.2009. Бюл. № 15.

15. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Иванов М.А., Охотин И.С. Устройство для дорнования отверстий малого диаметра. Патент РФ № 2383423. Опубл. 10.03.2010. Бюл. № 7.

16. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Устройство для дорнования отверстий малого диаметра. Патент РФ № 2288831. Опубл. 10.12.2006. Бюл. № 34.