

А. Л. Воронцов

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В двух томах

Том 1

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение»*

 **ИЗДАТЕЛЬСТВО**
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Москва
2014

УДК 621.735.043:621.983.1:621.777.24
ББК 34.623.4
В75

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *Б.А. Романцев*
д-р техн. наук, профессор *В.Н. Субич*

Воронцов А. Л.

В75 Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие : в 2 т. / А. Л. Воронцов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
ISBN 978-5-7038-3916-4

Т. 1. – 396, [4] с. : ил.
ISBN 978-5-7038-3917-1

В первом томе учебного пособия изложены теория процессов обработки металлов давлением и результаты теоретических и экспериментальных исследований различных операций. Приведены формулы и методы расчета основных технологических параметров с учетом исходной анизотропии свойств штампуемого материала, деформационной анизотропии, упрочнения, а также упругих деформаций формообразующего инструмента. Уточнены важные положения теории обработки металлов давлением, относящиеся к кривым упрочнения, а также к учету влияния масштаба обрабатываемой заготовки, скорости деформации и температурного эффекта. Рассмотрены теоретические методы прогнозирования разрушения заготовки и анализа распределения волокон структуры в получаемых изделиях, образования утяжин и застойных зон.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по направлению «Машиностроение», аспирантов и преподавателей, а также инженерно-технических и научных работников, специализирующихся в области обработки металлов давлением.

УДК 621.735.043:621.983.1:621.777.24
ББК 34.623.4

В оформлении обложки использованы материалы сайта www.puresugijyutsu.com

ISBN 978-5-7038-3917-1 (т. 1)
ISBN 978-5-7038-3916-4

© Воронцов А. Л., 2014
© Оформление Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i>	5
<i>Список основных обозначений</i>	8
<i>Введение</i>	10
Глава 1. Анализ существующих методов теоретического исследования	15
1.1. Общие положения.....	15
1.2. Метод линий скольжения и метод жестких блоков	16
1.3. Инженерный метод	17
1.4. Энергетический метод	18
1.5. Метод визиопластичности	19
1.6. Метод конечных разностей.....	20
1.7. Метод конечных элементов.....	20
1.8. Метод функции тока	23
1.9. Полуобратный метод	23
1.10. Необоснованность закона парности касательных напряжений	24
1.11. Методологические выводы	29
1.12. Историческая справка	34
Глава 2. Метод пластического течения	66
2.1. Учет анизотропии деформируемого материала	66
2.2. Взаимосвязанное определение параметров кинематического, напряженного и деформированного состояний	68
2.3. Теорема о верхней оценке при схематизации очага пластической деформации с разрывами в нормальных составляющих скоростей течения	73
2.4. Определение напряженно-деформированного состояния заготовки методом координатных сеток	77
Глава 3. Общие параметры деформирования	86
3.1. Кривые упрочнения	86
3.2. Коэффициенты трения	94
3.3. Неоднородность механических свойств	97
3.4. Скорость деформации и температурный эффект.....	100
Глава 4. Выдавливание цилиндрических стаканов	107
4.1. Напряженное состояние заготовки при свободном выдавливании анизотропного материала	107
4.2. Характеристики упругой деформации матрицы.....	112
4.3. Начальная стадия выдавливания	115
4.4. Стесненное выдавливание	119
4.5. Деформированное состояние заготовки	121
4.6. Учет упрочнения.....	141
4.7. Примеры практических расчетов	149

4.8. Физические закономерности выдавливания	169
4.9. Выдавливание стаканов в незакрепленной матрице	176
4.10. Выдавливание полых толстостенных деталей	183
Глава 5. Проблемы формоизменения при выдавливании цилиндрических стаканов	192
5.1. Анизотропия выдавливаемого материала	192
5.2. Застойная зона под торцом пуансона	195
5.3. Утяжина на внешней кромке дна изделия	197
5.4. Макроструктура выдавленного изделия	203
5.5. Разрушение	231
Глава 6. Выдавливание цилиндрических стаканов инструментом специальной формы	238
6.1. Выдавливание сферическим пуансоном	238
6.2. Выдавливание пуансоном с радиусной фаской	255
6.3. Выдавливание коническим пуансоном с малым углом конусности	261
6.4. Выдавливание коническим пуансоном с произвольным углом конусности	266
6.5. Выдавливание стаканов в конической матрице	281
6.6. Выдавливание ступенчатым пуансоном	285
Глава 7. Выдавливание сплошных стержней	309
7.1. Силовые параметры при свободном выдавливании	309
7.2. Силовые параметры и утяжина при стесненном выдавливании	314
7.3. Деформированное состояние заготовки	319
7.4. Прогнозирование разрушения	329
7.5. Выдавливание в оболочках	331
7.6. Редуцирование	336
Глава 8. Выдавливание трубных изделий	342
8.1. Напряженное состояние заготовки	342
8.2. Деформированное состояние заготовки	350
8.3. Прогнозирование разрушения	361
8.4. Редуцирование на оправке	363
8.5. Выдавливание изделий со ступенчатым отверстием	370
8.6. Выдавливание колец с коническим отверстием	380
<i>Литература</i>	383
<i>Приложения</i>	390

Ценность любой теории основана на том числе экспериментальных фактов, которые она может объяснить.

Эрнест Резерфорд

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время особое внимание уделяется улучшению качества металлопродукции, а также максимальному сокращению энергетических затрат и металла, требующихся для ее производства. При этом важную роль играет дальнейшее развитие процессов обработки металлов давлением, зависящее от совершенствования проектирования и расчета их основных параметров. Теоретическим методам определения оптимальных параметров процессов обработки металлов давлением и посвящено данное учебное пособие.

Задача технолога или конструктора, специализирующегося на обработке металлов давлением, – выбор наиболее оптимального варианта технологии, конструкции инструмента, параметров оборудования. Ранее для этого обычно использовалось большое число предварительных экспериментов, целью которых были проверка возможности осуществления и определение оптимальных параметров проектируемого технологического процесса. В настоящее время модернизация существующих и особенно внедрение новых технологических процессов обработки давлением затруднены проблемами сокращения сроков и стоимости подготовки производства, недостаточностью инвестиций и жесткой конкуренцией. Это приводит к невозможности изготовления экспериментального оборудования, в связи с чем возрастает роль требующих существенно меньших затрат теоретических методов проектирования. При этом такие особенности процессов холодного деформирования, как необходимость создания значительных сил деформирования и повышенная вероятность разрушения заготовки, предъявляют высокие требования к точности и надежности расчетных формул.

В математическую теорию процессов обработки металлов давлением внесли большой вклад многие отечественные ученые (Г.Я. Гун, В.Л. Колмогоров, А.Г. Овчинников, И.Л. Перлин, А.А. Поздеев, Е.А. Попов, И.П. Ренне, В.С. Смирнов, Г.А. Смирнов-Аляев, Л.Г. Степанский, М.В. Сторожев, И.Я. Тарновский, А.Д. Томлёнов, Е.П. Унксов, К.Н. Шевченко, Л.А. Шофман, С.П. Яковлев и другие). Была создана научная основа для разработки и совершенствования этих процессов, опубликовано большое количество превосходных для своего времени учебников и монографий. Однако изложенные в них результаты во многих случаях устарели, являются противоречивыми или недостаточными. Кроме того, работы по теории рассматриваемых процессов обработки давлением имеют односторонность, поскольку решают наиболее простую задачу определения силовых характеристик и при этом совершенно не затрагивают другие более

сложные задачи (например, нахождение накопленных деформаций и условий образования дефектов в виде трещин, утяжин и застойных зон, расчет волокнистой структуры деформируемого изделия, учет анизотропии свойств и упрочнения, реальной геометрии и упругих деформаций инструмента).

Все перечисленное, а также необходимость быстрой и квалифицированной оценки конструкторских и технологических решений, принимаемых при подготовке производства, делают актуальным разработку методов и формул, которые позволяли бы в комплексе и с достаточной точностью определить оптимальные параметры, необходимые для успешной реализации процессов обработки давлением.

Отсутствие в существующих учебниках по теории обработки металлов давлением ясно изложенной единой методологии решения нетривиальных технологических задач ограничивает будущее использование молодым специалистом возможностей теоретического анализа, вызывает у него стремление опираться при проектировании технологических процессов либо только на экспериментальные данные, либо на численный расчет параметров с помощью покупных программ, основанных на методе конечных элементов. Этому способствует и рассмотрение во многих учебных изданиях по теории процессов обработки давлением известных положений математики, механики сплошной среды и академической теории пластичности, но при этом отсутствуют конкретные примеры практического использования указанных положений.

Поскольку студент не видит примеров практического использования сложных для понимания общетеоретических положений, у него возникает представление об их бесполезности и появляется закономерное нежелание эти положения изучать. Кроме того, в случае необходимости, будущий специалист не сможет эти положения использовать, поскольку он не видел образцов конкретного применения.

В книге приведены теоретические результаты, полученные автором с помощью разработанных им общих методов (метод пластического течения, метод функции напряжений, методы прогнозирования дефектов в виде утяжин или застойных зон, метод расчета макроструктуры деформированных изделий, метод решения сложных вариационных задач). Рассмотрены разнообразные процессы обработки металлов давлением, такие как выдавливание и высадка (операции малоотходной объемной штамповки), осадка и прошивка (операции ковки), изгиб длинной полосы и вытяжка с утонением стенки (операции листовой штамповки), волочение труб и прутков (прокатное производство), а также гибка волокнистых композиционных материалов, сжатие пористых заготовок и осадка малопластичных материалов в оболочках (специальные операции обработки давлением). Большинство приведенных в издании формул для определения многих важнейших параметров процессов обработки давлением получены автором впервые и аналогов у других исследователей не имеет.

Автором учебного пособия была предпринята попытка изложить типовые теоретические методы взаимосвязанного расчета основных технологических параметров процессов обработки металлов давлением. В книгу включены лишь те положения, практическое использование которых четко доказано.

Следует отметить, что ни в одну из приведенных формул не вводились поправочные коэффициенты, полученные на основе экспериментов. Автор также избегал использования численных методов, поскольку надежные аналитические формулы окажут будущим технологам значительно большую пользу в быстрой оценке эффективности разрабатываемого технологического процесса.

Учебное пособие предназначено для студентов, аспирантов и преподавателей, поэтому подробно показаны вывод формул и примеры учета реальных факторов деформирования, а также приведены детальные методические указания по технике вычислений конкретных технологических параметров процессов обработки металлов давлением. Молодым специалистам учебное пособие может служить образцом использования теории для всесторонних расчетов параметров того или иного процесса обработки металлов давлением, а также экспериментального подтверждения полученных теоретических результатов.

Автор надеется, что учебное пособие поможет будущим специалистам уменьшить необходимость принятия необоснованных интуитивных решений, зачастую приводящих к ошибкам в выборе технологических переходов, кузнечного оборудования, в обеспечении прочности формообразующего инструмента.

Теоретические методы, эффективность применения которых подробно показана в главах книги, также с успехом могут быть использованы и для анализа любых других операций обработки металлов давлением, не рассмотренных в издании.

Автор выражает глубокую благодарность рецензентам доктору технических наук, профессору Б. А. Романцеву и доктору технических наук, профессору В. Н. Субичу за доброжелательную поддержку учебного пособия. Автор также искренне признателен кандидату технических наук, доценту С. М. Карпову за совместное проведение многочисленных экспериментов и слесарю высшего разряда по штампам Г. В. Баканову за изготовление необходимой экспериментальной оснастки.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

v_0	– скорость перемещения деформирующего инструмента, мм/с
v_c	– скорость движения образующей стенки стакана относительно выталкивателя, мм/с
$v_{\text{опт}}$	– оптимальная скорость перемещения матрицы при выдавливании с активными силами трения, мм/с
ξ_i	– скорость (интенсивность скоростей) деформации
e_i	– накопленная деформация (степень деформации)
e	– относительная линейная деформация
σ_s	– напряжение текучести, МПа
σ_{s0}	– предел текучести (начальное напряжение текучести), МПа
σ_{sz}, σ_{sp}	– напряжения текучести анизотропного материала в осевом и радиальном направлениях, МПа
σ_b	– временной предел прочности, МПа
σ_n	– нормальное напряжение на контактной поверхности, МПа
k_a	– коэффициент анизотропии
k_y	– коэффициент упрочнения
β	– коэффициент Луде
ψ	– коэффициент обжатия
μ	– коэффициент трения по напряжению текучести
f	– коэффициент трения по нормальному напряжению
ν	– коэффициент Пуассона
E	– модуль упругости
q_y	– натуральная удельная сила деформирования упрочняющегося материала, МПа
P	– сила деформирования, МПа
$P_{\text{тр}}$	– сила трения
α	– угол конусности рабочего торца пуансона, град
γ	– угол конусности матрицы, град
φ	– угол закручивания заготовки, рад
S	– площадь поверхности, мм ²

- V – объем, мм³
 D, d – диаметры, мм
 t° – температура, °С
 δ – погрешность расчета, %
 ρ – плотность
 p – давление, МПа
 m – моментные напряжения
 τ – касательные напряжения

Относительные величины силовых параметров, полученные делением параметра на среднее напряжение текучести материала заготовки

- q – удельная сила деформирования
 $q_{\text{акт.тр}}$ – удельная сила выдавливания с активными силами трения
 $q_{\text{круч}}$ – удельная сила выдавливания с кручением
 $q_{\text{тр}}$ – удельная сила трения в канале истечения
 p – максимальное давление, действующее на стенку матрицы
 σ – среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление)

Относительные величины геометрических параметров, полученные делением параметра на наибольший радиус рабочего торца пуансона

- z – осевая координата
 ρ – радиальная координата
 $R_{\text{н}}, R$ – наружный и внутренний радиусы матрицы
 s – рабочий ход пуансона
 h – начальная высота очага пластической деформации
 $h_{\text{у}}$ – высота очага пластической деформации упрочняющегося материала
 H_0 – начальная высота заготовки
 H – текущая высота выдавливаемого материала
 $h_{\text{с}}$ – высота цилиндрической стенки стакана
 $h_{\text{кр}}$ – критическая высота начала образования утяжины
 h_0 – высота профилированной части рабочего торца пуансона
 r_0 – радиус плоской части конического торца пуансона; радиус оправки
 r_1 – радиус фаски рабочего торца пуансона
 Δ – упругая деформация (перемещение) инструмента под воздействием штамповочных напряжений

ВВЕДЕНИЕ

подавляющее большинство процессов объемной штамповки можно представить в виде совокупности операций осадки или высадки исходной заготовки и ее выдавливания. Для примера рассмотрим формоизменение заготовки при получении поковки типа шестерни в штампе с горизонтальным разъемом (рис. В.1).

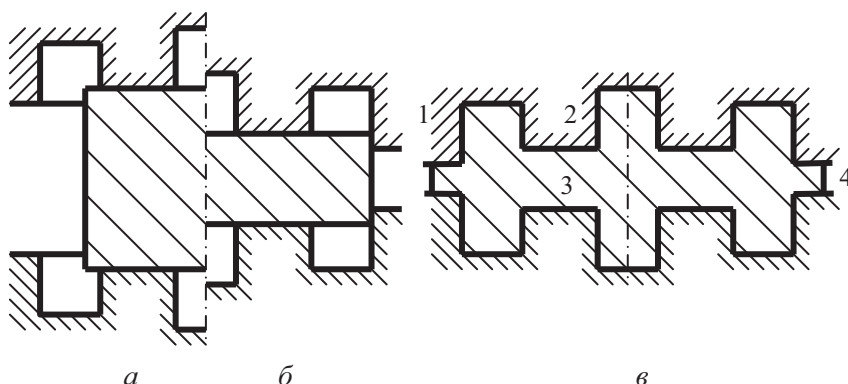


Рис. В.1. Формоизменение заготовки при получении поковки типа шестерни в штампе с горизонтальным разъемом:

1, 2 – полости; 3 – область осадки металла; 4 – облойная канавка

Как правило, процесс пластической деформации начинается с общей осадки заготовки (рис. В.1, а, б). После соприкосновения боковой поверхности заготовки с поверхностью штампа (см. рис. В.1, б) начинается интенсивное заполнение его полостей. При этом полости 1 и 2 (рис. В.1, в) заполняются путем выдавливания металла, в области 3 происходит дальнейшая осадка металла, а в области облойной канавки 4 – высадка. Таким образом, углубленное изучение процессов выдавливания, осадки и высадки является необходимой предпосылкой для создания теории большинства процессов обработки металлов давлением. Этим объясняется тот большой объем материала, который посвящен в учебном пособии указанным процессам.

Определения понятий «осадка» и «высадка» будут приведены в соответствующих разделах второго тома пособия.

Рассмотрим понятие «выдавливание», теоретическое исследование которого отличается исключительной сложностью.

Выдавливание – операция, при которой материал заготовки вытекает в один или несколько каналов, геометрия которых не зависит от рабочего хода (рис. В.2).

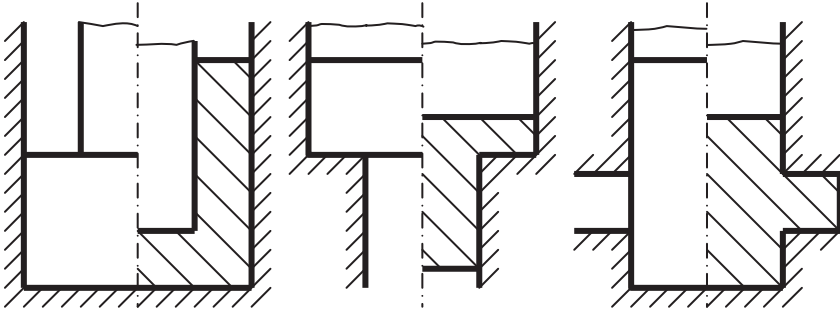


Рис. В.2. Примеры схем выдавливания

Поясним принципиальное различие выдавливания и осадки или высадки (рис. В.3). Например, при выдавливании коническим пуансоном (рис. В.3, а, б) входной и выходной зазоры Δ_1 и Δ_2 конической части канала истечения металла при увеличении рабочего хода пуансона постоянны. При осадке предварительно отформованной сходной заготовки (рис. В.3, в) значения аналогичных величин непрерывно изменяются. Точно так же при радиальном выдавливании геометрические параметры канала истечения металла по ходу выдавливания изменяться не будут (рис. В.3, г), а при высадке – будут зависеть от рабочего хода (рис. В.3, д).

В классической теории пластичности и сопротивлении материалов используются термины «свободное кручение» и «стесненное кручение». Первый термин означает кручение, при котором естественная деформация концевых сечений тела, называемая депланацией, ничем не ограничена. Второй термин описывает кручение, при котором на деформацию концевых сечений тела наложены ограничения, препятствующие естественному искажению этих сечений и заставляющие их принимать форму, предопределенную этими ограничениями (например, оставаться плоскими). Ввиду совпадения физического смысла этих терминов с рассматриваемой проблемой целесообразно ввести соответствующую терминологию и в теорию процессов выдавливания.

Свободное выдавливание – выдавливание, при котором высота очага пластической деформации определяется естественным пластическим течением металла. Очевидно, что свободное выдавливание возможно лишь в случае, когда начальная высота очага пластической деформации h меньше расстояния H между рабочим торцом пуансона и противоположной ему поверхностью штамповой полости (см. рис. В.3, а, б).

Стесненное выдавливание – выдавливание, при котором высота очага пластической деформации определяется расстоянием между рабочим торцом пуансона и противоположной ему поверхностью штамповой полости (см. рис. В.3, в).

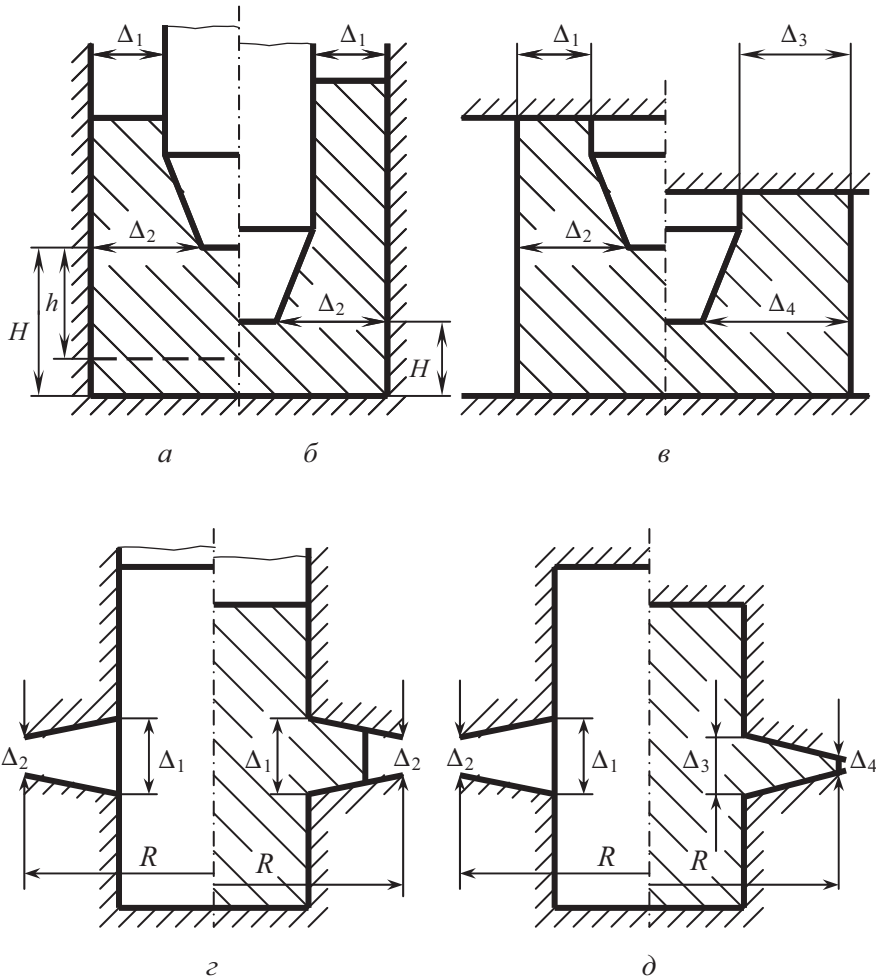


Рис. В.3. Схемы для определения геометрических параметров выдавливания коническим пуансоном (а, б) и осадки (в), радиального выдавливания (z) и высадки (д)

В учебном пособии в формулах для расчета параметров выдавливания использованы относительные величины геометрических параметров, полученные делением параметра на наибольший радиус рабочего торца пуансона, что упрощает формулы и делает более наглядным сравнение результатов расчетов. Как для вычисления параметров выдавливания, так и для других расчетов параметров малоотходной штамповки применяются относительные величины напряжений, удельной силы деформирования и максимального давления на стенку матрицы, полученные делением самой величины на среднее напряжение текучести материала заготовки. Для определения натуральных значений перечисленных параметров следует умножать их на среднее напряжение текучести материала заготовки: $q_y = \sigma_s q$; $p_y = \sigma_s p$.

В целях сокращения слово «относительная» будет опускаться. Так, вместо «относительная удельная сила деформирования» будет записано «удельная сила деформирования», вместо «относительная высота очага пластической деформации» – «высота очага пластической деформации», вместо «относительный радиус матрицы» – «радиус матрицы» и т. п. В тех случаях, когда необходимо использовать не относительное, а действительное значение параметра, будет использовано слово «натуральное», например, «натуральное значение удельной силы деформирования».

В разделах, относящихся к выдавливанию, приведены формулы преимущественно для расчета параметров обратного выдавливания. Однако для того, чтобы не ограничивать действительную область применения полученных формул, автор избегал использования этого слова. С помощью предлагаемых формул можно вычислять и параметры прямого выдавливания (существенным отличием прямого выдавливания от обратного является необходимость проталкивания недеформированной части заготовки, расположенной между очагом пластической деформации и активным инструментом). Для определения удельной силы деформирования при прямом выдавливании следует учитывать удельную силу, затрачиваемую на преодоление дополнительного трения между жесткой частью заготовки и контейнером, а также то, что активный при обратном выдавливании инструмент при прямом выдавливании становится пассивным, а пассивный – активным. Последнее обуславливает изменение удельной силы деформирования пропорционально соотношению площадей инструментов, активных в том и другом процессе. Соответствующие формулы будут приведены в тех разделах, где это необходимо.

Автор также полагает необходимым пояснить принципиальное различие формул для определения удельной силы деформирования, приведенных в книге, и большинства аналогичных формул. Хотя авторы многих учебников, справочников и теоретических работ, посвященных определению удельной силы деформирования, пишут о хорошей или удовлетворительной сходимости результатов своих решений со своими экспериментальными данными, тем не менее в относительных величинах эти расчетные результаты сильно (иногда более чем в 2 раза) отличаются. Возникает вопрос: что обеспечивает удовлетворительную сходимость натуральных значений, получаемых по столь разным формулам, с экспериментальными данными? Существует несколько субъективных причин.

В экспериментах обычно используют холодную деформацию, теоретическая удельная сила деформирования которой в общем виде определяется по формуле $q_y = \sigma_s(e_p)q$, где σ_s – напряжение текучести деформируемого материала, зависящее от накопленной деформации e_p ; q – относительная удельная сила деформирования.

Поскольку, например, в работах других исследователей при выдавливании теоретическая сила q при отсутствии эффекта дна не зависит от рабочего хода, это позволяет выбрать для сравнения любую точку экспериментальной диаграммы изменения силы по ходу деформирования. Как правило, эта диаграмма является переменной, что обусловлено упрочнением деформируемого материала

и ростом трения в процессе штамповки. Естественно, авторы, получившие заниженное значение q , берут для сравнения начальные точки экспериментальной диаграммы, в которых сила деформирования меньше, в то время как авторы, получившие завышенное значение – конечные точки диаграммы.

В других работах отсутствует достаточно строгое определение накопленной деформации e_i в зависимости от рабочего хода, а используются условные показатели, основанные на соотношении начальных и конечных площадей поперечного сечения заготовки. Это позволяет авторам, в зависимости от отклонения значения q от желаемого, рекомендовать для расчетов «начальное», «конечное» или же «среднее» значения σ_s , причем последнее при необходимости истолковывается то как среднее арифметическое, то как среднее геометрическое. Однако в данном учебном пособии будет показано, что ни одно из этих понятий в их традиционном употреблении не соответствует физике большинства процессов обработки металлов давлением.

Наконец, для расчетов параметров часто используют не реальные кривые упрочнения, а их аппроксимации, выполненные по условным рекомендациям, искажающим результат в ту или иную подходящую сторону.

Существует также весьма распространенное мнение, что не стоит слишком тщательно и строго выводить формулы для определения относительной удельной силы q , поскольку вся точность будет сведена на нет погрешностью экспериментального определения напряжения текучести σ_s . С таким мнением нельзя согласиться. Во-первых, оно резко снижает стремление студентов и молодых специалистов к углубленному изучению теории обработки металлов давлением, а, во-вторых, многочисленные исследования, проведенные автором, показывают, что вклад в общую погрешность определения удельной силы холодного деформирования упрочняющегося материала q_y погрешностей определения величин σ_s , e_i и q равнозначен. Поэтому не следует добавлять к одной погрешности другую, не менее существенную, так как это часто является причиной полной непригодности результатов расчетов для практики.

В учебном пособии изложены достаточно строгие методы определения всех трех компонентов удельной силы деформирования упрочняющегося материала с учетом нестационарности, присущей большинству рассматриваемых процессов обработки металлов давлением. Другими словами, предлагаемые вниманию читателя формулы позволяют найти значение удельной силы для любого конкретного значения рабочего хода инструмента, т. е. теоретически построить диаграмму изменения этой силы по ходу деформации с упрочнением. Это обязывало автора при выводе формул обеспечить достаточную для практики сходимости не в какой-либо «удобной» точке экспериментальной диаграммы, а на всем ее протяжении. В этом и заключается принципиальное отличие рассматриваемых силовых формул учебного пособия от формул, полученных другими исследователями.

Глава 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Общие положения

В академической теории пластичности наибольшее внимание уделяется математической строгости решения задачи. Для получения достаточно строгого решения часто принимается, например, полное отсутствие контактного трения или условие полного прилипания, что никогда не соответствует реальным процессам обработки давлением. Во многих случаях академические решения приводят либо к громоздким и сложным математическим выражениям, либо к необходимости численного решения полученных уравнений. Очевидно, полагаясь на строгость математики, авторы академических решений никогда не выполняют их проверку путем сопоставления с экспериментальными данными. Поэтому не всегда теории, основанные на применении сложных математических вычислений, позволяют получить достоверные результаты.

Некоторые попытки применения отдельных академических решений для расчета параметров реальных процессов обработки металла давлением дают неудовлетворительные результаты. Этому способствует то, что подавляющее большинство теоретиков имеет дело лишь с принятыми в академических кругах абстрактными схемами технологических операций. Чтобы создать полноценную для практики теорию процесса обработки металлов давлением, необходимо хорошо разбираться в кузнечно-прессовом оборудовании, знать технологические режимы, конструкцию применяемой штамповой оснастки, а также специфику конкретных изделий, получаемых с помощью данного процесса. Без этого теоретик не сможет отвечать именно на те вопросы, которые возникают перед технологом-практиком.

Несмотря на то, что в академической теории пластичности получены решения для расчета параметров процессов осадки, прессования, выдавливания, волочения и т. п., ни одно из решений не применяется при проектировании процессов обработки металлов давлением.

Если для академического теоретика важны такие проблемы, как, например, доказательство единственности решения, то теоретика обработки металлов давлением подобные проблемы не интересуют. Усилия последнего сосредоточены

Глава 2

МЕТОД ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ

2.1. Учет анизотропии деформируемого материала

Разработанный метод пластического течения реализован на методе полубратных решений. В этом методе устранен ряд его недостатков и добавлены новые возможности, позволяющие ставить сложные задачи, ранее не имевшие решений в теории обработки металлов давлением. Название метода отражает то, что в его основу положена теория пластического течения, с помощью которой можно определить параметры кинематического, напряженного и деформированного состояния в любой точке очага пластической деформации, учесть анизотропию, нестационарность процесса и историю деформирования.

Различия теории и метода пластического течения обусловлены общими отличиями академической теории пластичности от теории обработки металлов давлением.

Допущения, принятые в решениях задач пластической деформации анизотропных листовых материалов, о том, что деформированное или напряженное состояние является плоским, неприменимы для решения объемных осесимметричных задач выдавливания. Поэтому необходимо исследовать основные соотношения теории пластичности анизотропных тел Мизеса – Хилла и привести их к виду, удобному для решения таких задач.

Условие пластичности для осесимметричного напряженного состояния анизотропного тела

$$F(\sigma_\rho - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + H(\sigma_\theta - \sigma_\rho)^2 + 2L\tau_{pz}^2 = 1. \quad (2.1)$$

Здесь F, G, H, L – параметры, характеризующие текущее состояние анизотропии,

$$\begin{aligned} 2F &= \frac{1}{\sigma_{sp}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} - \frac{1}{\sigma_{s\theta}^2}; & 2G &= \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{s\theta}^2} - \frac{1}{\sigma_{sp}^2}; \\ 2H &= \frac{1}{\sigma_{s\theta}^2} + \frac{1}{\sigma_{sp}^2} - \frac{1}{\sigma_{sz}^2}; & 2L &= \frac{1}{\tau_{spz}^2}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\sigma_{sp}, \sigma_{sz}, \sigma_{s\theta}, \tau_{spz}$ – напряжения текучести материала в разных направлениях.

ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

3.1. Кривые упрочнения

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением необходимо знание *кривой упрочнения*, т. е. зависимости напряжения текучести материала σ_s от степени деформации e_i . Какими бы точными ни были теоретические исследования и полученные на их основе математические модели, неправильное задание зависимости $\sigma_s = f(e_i)$ сводит на нет все уточнения и делает получаемые результаты непригодными для практики. Поэтому проблема качественной обработки результатов испытаний образцов на простое растяжение или сжатие, как и нахождение наиболее достоверной аппроксимации кривой упрочнения, стала предметом изучения многих исследователей. Тем не менее эта проблема до сих пор требует углубленного анализа. Рассмотрим некоторые определения и пояснения.

Степень деформации¹ – величина, полная производная которой по времени равна интенсивности скоростей деформации $de_i/dt = \xi_i$, откуда

$$e_i = \int_0^t \xi_i dt. \quad (3.1)$$

Напряжение текучести σ_s – напряжение, вызывающее в условиях линейного напряженного состояния пластическую деформацию при данной накопленной деформации. Напряжение текучести изменяется по ходу упрочнения материала, т. е. является переменной величиной, которую следует отличать от постоянной величины, называемой пределом текучести.

Предел текучести σ_{s0} , *или начальное напряжение текучести* – напряжение, при котором возникают пластические деформации в начальный момент деформирования (рис. 3.1).

Покажем, что при испытаниях образцов на растяжение или сжатие накопленной деформацией является логарифмическая деформация (истинная деформация), а не относительное удлинение или уменьшение площади

¹ Далее вместо термина «степень деформации» будем использовать термин «накопленная деформация».

Глава 4

ВЫДАВЛИВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАКАНОВ

4.1. Напряженное состояние заготовки при свободном выдавливании анизотропного материала

Очаг пластической деформации включает в себя кольцевую область 1 и область 2, расположенную под торцом пуансона (рис. 4.1). Следует отметить, что на этом и других аналогичных рисунках данного учебного пособия форма верхней и нижней границ очага деформации в области 1 условно показана в виде горизонтальных прямых линий, так как это упрощает чертежи. В действительности форма границ не задается заранее, а находится с помощью соответствующего метода (подробнее рассмотрено в гл. 11).

Рассмотрим область 1. Подходящая осевая скорость течения

$$v_z = A[z - \varphi(\rho)], \quad (4.1)$$

при этом

$$v_\rho = 0,5A \left(\frac{R^2}{\rho} - \rho \right). \quad (4.2)$$

Подставляя выражения (4.1), (4.2) и $v_\theta = 0$ в систему (2.19), найдем скорости деформаций

$$\begin{aligned} \xi_\rho &= -\frac{1}{2}A \left(\frac{R^2}{\rho^2} + 1 \right); \\ \xi_\theta &= \frac{1}{2}A \left(\frac{R^2}{\rho^2} - 1 \right); \\ \xi_z &= A; \\ \eta_{\rho z} &= -A\varphi'(\rho). \end{aligned} \quad (4.3)$$

С учетом системы (4.3) из (2.7) следует, что эквивалентная скорость деформации $\xi_{\text{эКВ}}$ зависит только от координаты ρ . Согласно четвертому уравнению системы (2.4) и системе (4.3), можно сделать вывод о зависимости величины $\tau_{\rho z}$

Глава 5

ПРОБЛЕМЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ВЫДАВЛИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАКАНОВ

5.1. Анизотропия выдавливаемого материала

Анизотропный материал – материал, обладающий в разных направлениях различными свойствами. Анизотропия механических свойств металлических материалов обусловлена, во-первых, особенностями их кристаллического строения, а, во-вторых, особенностями структуры, получающейся в результате обработки методами пластического деформирования. Кристаллическая анизотропия также называется *гомогенной анизотропией* и является следствием анизотропии самого кристалла, составляющего основу металла. Поскольку металлы состоят из большого числа хаотично ориентированных относительно друг друга микроскопических кристаллов, связанных в зерна, взаимная ориентация которых весьма разнообразна, то это приводит к практически полному отсутствию гомогенной анизотропии у поликристаллических металлов.

При обработке металлов давлением появляется *текстура*, т. е. определенная ориентация составляющих структуру зерен и межзеренных включений, вызванная их вытягиванием вдоль направления пластического течения при обработке давлением. Анизотропия, обусловленная ориентацией структуры материала, называется *гетерогенной анизотропией*. У металлических материалов после прокатки или прессования, как правило, возникает волокнистая, строчечная и пластинчатая структура. Волокнистая и строчечная структура характерна для сталей, а пластинчатая – для алюминиевых сплавов (их зерна имеют форму не волокон, а пластин, что способствует образованию слоистой структуры материала и еще большему проявлению анизотропии). Например, у горячекатаной стали 45 предел текучести продольных волокон $\sigma_{s0\text{прод}} = 335$ МПа, а предел текучести поперечных волокон $\sigma_{s0\text{попер}} = 311$ МПа. У закаленного и естественно состаренного алюминиевого сплава Д16 после прессования $\sigma_{s0\text{прод}} = 390$ МПа, а $\sigma_{s0\text{попер}} = 293$ МПа. К гетерогенной анизотропии также относят конструктивную анизотропию, проявляющуюся, например, у слоистых или волокнистых композиционных материалов, при которой различия продольного и поперечного напряжений текучести еще более возрастают.

Глава 6

ВЫДАВЛИВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАКАНОВ ИНСТРУМЕНТОМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

6.1. Выдавливание сферическим пуансоном

Влияние формы торца пуансона на удельную силу деформирования исследовалось во многих работах. Полученные результаты крайне противоречивы. Так, выдавливание пуансоном со сферическим торцом требует больших сил, чем выдавливание пуансоном с плоским торцом, в то время как теоретические исследования показывают прямо противоположное. По полученным экспериментально коэффициентам формы пуансонов сделан вывод, что независимо от условий деформирования одна форма торца по силе оптимальнее другой. В качестве оптимального рекомендуют конический пуансон с углом конусности $60...75^\circ$ и плоской площадкой диаметром, равным половине диаметра рабочего пояса. Согласно другим данным, оптимальным будет пуансон с углом конусности 85° . Однако в ряде работ показано, что оптимальность формы торца пуансона существенно зависит от обжатия. Например, при обжатии менее 58% оптимален пуансон с торцом в виде сферы, радиус которой в 1,5 раза превышает диаметр рабочего пояса пуансона, а при обжатии более 58% – пуансон с небольшой конической фаской и углом конусности 63° . Эти результаты не согласуются с экспериментами, согласно которым при выдавливании нормализованных заготовок из стали 10 с обжатием 55...62% изменение угла конусности в диапазоне значений $20...85^\circ$ уменьшило удельные силы деформирования на 15...20%. Установлено, что пуансоны с заостренной формой торца снижают силу деформирования, но вызывают преждевременное истечение слоя смазки из-под торца инструмента, ограничивая глубину выдавливаемой за один переход полости; при эксцентричной установке заготовки происходит ее накернивание заостренным пуансоном, затрудняющее выравнивание последнего и приводящее к его изгибу и возможной поломке. Поэтому применение заостренных пуансонов не рекомендуется.

На удельные силы деформирования влияет и радиус скругления кромки пуансона; имеющиеся данные по этому вопросу также противоречивы. По одним данным с увеличением радиуса фаски сила деформирования снижается, а по другим – с увеличением этого радиуса сила возрастает.

ВЫДАВЛИВАНИЕ СПЛОШНЫХ СТЕРЖНЕЙ

7.1. Силовые параметры при свободном выдавливании

Выдавливание сплошных стержней может осуществляться как прямым (рис. 7.1, *а*), так и обратным (рис. 7.1, *б*) способом. При прямом выдавливании заготовка помещается в полость контейнера (см. рис. 7.1, *а*, слева) и при рабочем ходе сплошного пуансона выдавливается через отверстие матрицы, расположенной внизу контейнера (см. рис. 7.1, *а*, справа). В этом случае кроме силы, необходимой для реализации процесса пластической деформации, требуется дополнительно преодолевать силу трения между контейнером и перемещаемой вниз жесткой областью заготовки в зоне $H - h$. При обратном выдавливании (см. рис. 7.1, *б*) формообразующее отверстие выполняется непосредственно в пуансоне, поэтому для осуществления процесса не требуется перемещать расположенную ниже пластической области h жесткую область заготовки и соответственно преодолевать силу трения между ней и контейнером. Таким образом, сила, необходимая для обратного выдавливания, при наличии жесткой области будет несколько меньше, чем сила, требующаяся для прямого выдавливания. Опыты показывают, что при хорошей смазке трение между контейнером и жесткой областью заготовки незначительно влияет на силовые параметры прямого выдавливания. Уменьшение длины зоны $H - h$ в 2 раза приводит к изменению силы лишь на 3...5%. Следует также отметить, что прямое выдавливание позволяет получать значительно большее разнообразие геометрических форм изделий,

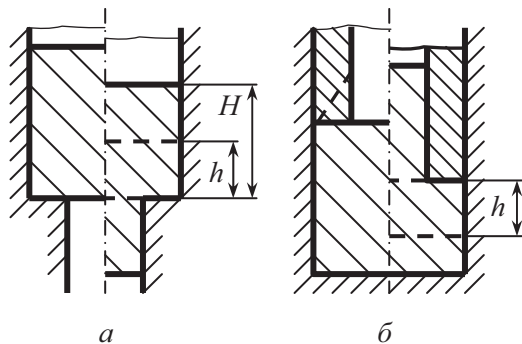


Рис. 7.1. Схемы прямого (а) и обратного (б) выдавливания стержня

ВЫДАВЛИВАНИЕ ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ

8.1. Напряженное состояние заготовки

Выдавливание трубных изделий (рис. 8.1) может осуществляться как прямым, так и обратным способом (см. рис. 7.1). За исключением центральной утяжины, все основные закономерности, рассмотренные в гл. 7, при выдавливании трубных изделий сохраняются.

Далее будет изложено общее определение напряженного состояния, справедливое для трубных изделий и для сплошных стержней. В связи с этим проанализируем имеющиеся результаты.

Рекомендуемые в литературе формулы для определения удельной силы деформирования при прямом выдавливании сплошных ступенчатых стержней дают значительную погрешность по сравнению с погрешностью экспериментальных исследований. Недостатки этих формул легко обнаруживаются путем их предельного анализа.

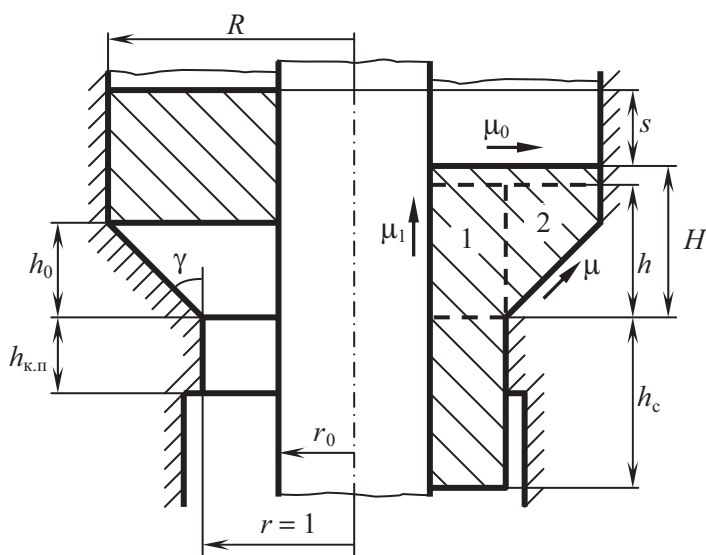


Рис. 8.1. Расчетная схема для определения параметров выдавливания трубного изделия:
1 – центральная, 2 – периферийная области заготовки

ЛИТЕРАТУРА

Антонов Е. А., Пасюта А. В. Влияние геометрии инструмента и степени деформации на удельные давления деформирования и характер течения металла при обратном способе выдавливания полых стаканов. *Проектирование деталей и механизмов машин. Обработка давлением*, 1970, № 1, с. 258–266.

Аранович А. В., Орро П. И., Ковалевский Н. Г. Теплое волочение труб из нержавеющей стали. *Сталь*, 1973, № 4, с. 347–350.

Басовский Л. Б., Моисеев Е. Ф., Ренне И. П., Татаринцов П. И. Холодное выдавливание цилиндрических деталей из малоуглеродистой стали. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1977, № 9, с. 14–16.

Безухов Н. И., Лужин О. В. *Приложения методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач*. Москва, Высшая школа, 1974, 200 с.

Бернштейн М. М. Определение усилия волочения и величины среднего значения сопротивления деформации. *Труды Украинского научно-исследовательского трубного института*. Харьков, Metallurgizdat, 1959, вып. 1, с. 145–156.

Биск М. Б., Греков И. А., Славин В. Б. *Холодная деформация стальных труб. Т. 1*. Свердловск, Среднеуральское кн. из-во, 1976, 231 с.

Браутман Л., Крок Р. *Современные композиционные материалы*. Москва, Мир, 1970, 428 с.

Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. *Справочник по математике*. Москва, ГИТТЛ, 1956, 608 с.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при обратном выдавливании. *Известия вузов. Машиностроение*. 1980, № 10, с. 108–112.

Воронцов А. Л. Деформированное состояние заготовки в условиях нестационарного пластического течения. *Труды МВТУ. Машины и технология ОМД*, 1980, № 335, с. 102–113.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при обратном выдавливании анизотропного материала. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1980, № 12, с. 107–111.

Воронцов А. Л. Деформированное состояние заготовки при обратном выдавливании. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1982, № 3, с. 113–117.

Воронцов А. Л. Определение оптимальной скорости перемещения матрицы при обратном выдавливании с активными силами трения. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1982, № 5, с. 131–136.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при выдавливании пуансоном с малым углом конуса. *Статическая и динамическая прочность тонкостенных элементов машиностроительных конструкций. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, ВЗМИ, 1984, с. 3–8.

Воронцов А. Л. Анализ начальной стадии обратного выдавливания. *Статическая и динамическая прочность машиностроительных конструкций. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, ВЗМИ, 1986, с. 100–104.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при выдавливании пуансоном со сферическим торцом произвольного радиуса. *Совершенствование процессов обработки металлов давлением. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, ВЗМИ, 1987, с. 37–44.

Воронцов А. Л. Анализ появления утяжины при выдавливании полых изделий. *Статическая и динамическая прочность машиностроительных конструкций. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, МИП, 1989, с. 94–99.

Воронцов А. Л. Обеспечение САПР процессов выдавливания изделий с профилированной боковой поверхностью. *Математическое моделирование нестационарных процессов и автоматизированные системы. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, МИП, 1992, с. 86–91.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние сплошной заготовки при радиальном выдавливании. *Вопросы исследования прочности деталей машин. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, МИП, 1993, с. 23–29.

Воронцов А. Л. Деформированное состояние заготовки при выдавливании в условиях эффекта дна. *Некоторые задачи математического моделирования нестационарных процессов. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, МИП, 1994, с. 44–46.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при выдавливании с раздачей. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1997, № 7, с. 15–19.

Воронцов А. Л. Напряженное и кинематическое состояние при обратном выдавливании трубной заготовки и выдавливании ступенчатым пуансоном. *Вестник машиностроения*, 1997, № 12, с. 42–45.

Воронцов А. Л. Анализ напряженного и кинематического состояний сплошной и трубной заготовки при радиальном выдавливании. *Вестник машиностроения*, 1998, № 3, с. 33–35.

Воронцов А. Л. Анализ кинематического, напряженного и деформированного состояний заготовки при выдавливании цилиндрического пуансона в полупространство. *Вестник машиностроения*, 1998, № 7, с. 44–47.

Воронцов А. Л. Общий метод теоретического анализа процессов выдавливания. *Проблемы создания технических систем с искусственным интеллектом. Науч. тр. межвузовской научно-технической конференции.* Москва, МГАПИ, 1998, с. 50–53.

Воронцов А. Л. Метод расчета накопленных деформаций при выдавливании полых изделий типа стаканов. *Вестник машиностроения*, 1999, № 7, с. 41–45.

Воронцов А. Л. Деформированное состояние заготовки при радиальном выдавливании. *Вестник машиностроения*, 1999, № 10, с. 36–40.

Воронцов А. Л. Анализ выдавливания полых изделий цилиндрическим пуансоном со сферическим торцом. *Вестник машиностроения*, 1999, № 11, с. 46–50.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при выдавливании полых изделий цилиндрическим пуансоном с радиусными фасками. *Вестник машиностроения*, 2000, № 9, с. 46–49.

Воронцов А. Л. Аналитическое исследование совместного истечения разнородных материалов при выдавливании стержневых изделий. *Вестник машиностроения*, 2000, № 11, с. 47–48.

Воронцов А. Л. *Расчетно-проектировочные работы по курсам кафедры «Прикладная механика»*. Москва, МГАПИ, 2001, 50 с.

Воронцов А. Л. Методические указания по аппроксимации кривых упрочнения. *Производство проката*, 2001, № 3, с. 21–25.

Воронцов А. Л. Методические указания по определению напряженно-деформированного состояния методом делительных сеток. *Производство проката*, 2001, № 4, с. 3–8.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки с учетом упругой деформации матрицы при выдавливании полых изделий с реактивными и активными силами трения. *Вестник машиностроения*, 2001, № 6, с. 51–56.

Воронцов А. Л. Об аппроксимации кривых упрочнения. *Вестник машиностроения*, 2002, № 1, с. 51–54.

Воронцов А. Л. О целесообразности использования метода конечных элементов на примере учета прочностной неоднородности материала в расчетах процессов обработки давлением. *Производство проката*, 2002, № 2, с. 5–9.

Воронцов А. Л. Кинематическое состояние заготовки при выдавливании полых изделий. *Вестник машиностроения*, 2002, № 3, с. 62–64.

Воронцов А. Л. Теорема о верхней оценке при схематизации очага пластической деформации с разрывами в нормальных составляющих скоростей течения. *Производство проката*, 2002, № 5, с. 2–4.

Воронцов А. Л. Оптимизация технологии производства полых изделий путем применения выдавливания с раздачей заготовки в движущейся матрице. *Производство проката*, 2002, № 9, с. 6–14.

Воронцов А. Л. Сопоставление применения метода конечных элементов и аналитических методов решения задач обработки давлением. *Вестник машиностроения*, 2003, № 1, с. 67–71.

Воронцов А. Л. Новый метод решения инженерных задач обработки давлением. *Производство проката*, 2003, № 3, с. 2–9.

Воронцов А. Л. Выбор коэффициентов трения в расчетах процессов выдавливания. *Производство проката*, 2003, № 4, с. 2–5.

Воронцов А. Л. Учет скорости деформации и температурного эффекта в расчетах процессов обработки давлением на примере выдавливания. *Производство проката*, 2003, № 5, с. 21–25.

Воронцов А. Л. Учет неоднородности механических свойств и скорости деформирования в расчетах процессов обработки давлением. *Вестник машиностроения*, 2003, № 6, с. 64–69.

Воронцов А. Л. Решение задач обработки давлением новым методом функции напряжений. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2003, № 7, с. 22–28.

Воронцов А. Л. Редуцирование полых цилиндрических изделий на оправке. *Вестник машиностроения*, 2003, № 8, с. 72–78.

Воронцов А. Л. Анализ методов теоретического исследования процессов обработки металлов давлением. *Производство проката*, 2003, № 9, с. 6–11.

Воронцов А. Л. Закономерности пластического течения при выдавливании полых изделий. *Производство проката*, 2003, № 11, с. 27–38.

Воронцов А. Л. Определение технологических параметров выдавливания стаканов с активными силами трения и в незакрепленной матрице. *Вестник машиностроения*, 2003, № 12, с. 61–67.

Воронцов А. Л. Выдавливание полых изделий в движущейся матрице. *Производство проката*, 2004, № 3, с. 21–29.

Воронцов А. Л. Расчеты параметров холодного выдавливания полых цилиндрических изделий. Часть 1. *Производство проката*, 2004, № 5, с. 29–34.

Воронцов А. Л. Расчеты параметров холодного выдавливания полых цилиндрических изделий. Часть 2. *Производство проката*, 2004, № 6, с. 31–34.

Воронцов А. Л. Напряженное состояние заготовки при выдавливании полых цилиндрических изделий с противонапряжением. *Вестник машиностроения*, 2004, № 5, с. 62–65.

Воронцов А. Л. Закономерности выдавливания стаканов в незакрепленной матрице. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004, № 6, с. 26–32.

Воронцов А. Л. Определение технологических параметров выдавливания стаканов с противонапряжением. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004, № 8, с. 23–27.

Воронцов А. Л. Определение технологических параметров выдавливания с кручением. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004, № 11, с. 30–34.

Воронцов А. Л. Выдавливание цилиндрических изделий с кручением. *Вестник машиностроения*, 2004, № 11, с. 50–56.

Воронцов А. Л. Теория выдавливания цилиндрических стаканов с противонапряжением. *Производство проката*, 2004, № 11, с. 29–33.

Воронцов А. Л. *Теория штамповки выдавливанием*. Москва, Машиностроение, 2004, 721 с.

Воронцов А. Л. *Теория малоотходной штамповки*. Москва, Машиностроение, 2005, 859 с.

Воронцов А. Л., Бузинов С. В. Гибка волокнистого композиционного материала вдавливанием в пластическую среду. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1981, № 4, с. 123–127.

Воронцов А. Л., Бузинов С. В. Гибка волокнистых композиционных материалов с наложением сжимающих напряжений. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1982, № 9, с. 151–154.

Воронцов А. Л., Ковалева Н. М., Сафонова Г. Г. Напряженное состояние заготовки при выдавливании пуансоном с большим углом конуса. *Расчеты*

на прочность и жесткость элементов машиностроительных конструкций. *Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, ВЗМИ, 1987, с. 69–75.

Воронцов А. Л. *Теория процессов обработки давлением.* В 2 т. Москва, Машиностроение, 2006.

Воронцов А. Л. *Технологические задачи теории пластичности.* В 3 т. Москва, Машиностроение, 2006.

Галлагер Р. *Метод конечных элементов.* Москва, Мир, 1984, 428 с.

Глебов И. Ф. Геометрия рабочего инструмента для холодного выдавливания металлов. *Машиностроитель*, 1966, № 2, с. 5–7.

Головин В. А., Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Технологияковки и объемной штамповки. Ч. 2. *Малоотходная объемная штамповка.* Москва, Машиностроение, 2004, 435 с.

Головин В. А., Митькин А. Н., Резников А. Г. *Технология холодной штамповки выдавливанием.* Москва, Машиностроение, 1970, 152 с.

Головин В. А., Ракошиц Г. С., Навроцкий Г. А. *Технология и оборудование холодной штамповки.* М.: Машиностроение. 1987. 350 с.

Граздил Ф. Научно-исследовательские работы в области холодной штамповки металлов выдавливанием. *Современное состояние кузнечно-штамповочного производства.* Машгиз, 1961, с. 312–335.

Громов Н. П. *Теория обработки металлов давлением.* Москва, Металлургия, 1967, 340 с.

Девятков В. В., Столбов В. Ю., Леняшин В. Б. Решение задачи напряженно-деформированного состояния металла при выдавливании методом конечных элементов. *Совершенствование процессов обработки металлов давлением.* 1987. с. 45–52.

Джонсон В., Кудо Х. *Механика процесса выдавливания металла.* Москва, Металлургиздат, 1965, 174 с.

Джонсон У., Меллор П. *Теория пластичности для инженеров.* М.: Машиностроение. 1979. 567 с.

Дмитриев А. М., Антошин М. А., Орлихин А. В. Определение усилия обратного выдавливания ступенчатым пуансоном. *Машины и технология обработки металлов давлением. Тр. МВТУ.* 1980, № 335, с. 137–145.

Дмитриев А. М., Бороздин В. А. Холодное выдавливание конических стаканов с цилиндрической полостью. *Вопросы исследования прочности деталей машин. Межвузовский сб. науч. тр.* Москва, МГАПИ, 1996, с. 71–76.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Кинематическое, напряженное и деформированное состояния заготовки при выдавливании полых цилиндрических изделий пуансоном с полусферическим торцом. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2001, № 3, с. 63–77.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. *Технологияковки и объемной штамповки. Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием.* Москва, Высшая школа, 2002, 400 с.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Определение технологических параметров выдавливания полых цилиндрических изделий. *Справочник. Инженерный журнал*, 2002, № 2, с. 10–17.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Влияние формы пуансона на силу выдавливания и качество полых цилиндрических изделий. *Справочник. Инженерный журнал*, 2002, № 3, с. 16–22.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий коническими пуансонами. *Справочник. Инженерный журнал*, 2002, № 4, с. 14–20.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Влияние упругой деформации матрицы на процесс выдавливания полых цилиндрических изделий. *Справочник. Инженерный журнал*, 2002, № 5, с. 6–11.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Определение с учетом упругой деформации матрицы технологических параметров штамповки выдавливанием. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2002, № 2, с. 76–93.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Аппроксимация кривых упрочнения металлов. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2002, № 6, с. 16–21.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выдавливание полых цилиндрических изделий ступенчатым пуансоном. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2002, № 3, с. 94–122.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Общая теория выдавливания полых изделий ступенчатым пуансоном и ее практическое применение. *Производство проката*, 2002, № 10, с. 2–17.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Оценка нагрузки на инструмент при выдавливании изделий со сквозной ступенчатой полостью. Часть 1. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2002, № 10, с. 21–28.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Оценка нагрузки на инструмент при выдавливании изделий со сквозной ступенчатой полостью. Часть 2. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2002, № 11, с. 21–28.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Напряженно-деформированное состояние при выдавливании ступенчатого отверстия в полых цилиндрических заготовках. *Производство проката*, 2003, № 3, с. 25–35.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Оптимизация процессов холодной штамповки редуцированием. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2003, № 5, с. 3–7.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Напряженно-деформированное состояние заготовки при выдавливании ступенчатых стержней. *Производство проката*, 2003, № 6, с. 2–13.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Определение технологических параметров выдавливания сплошных ступенчатых стержней. *Производство проката*, 2003, № 7, с. 25–36.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Определение технологических параметров выдавливания трубных изделий. *Производство проката*, 2003, № 8, с. 34–41.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Напряженно-деформированное состояние при осадке цилиндрической заготовки. *Производство проката*, 2003, № 10, с. 2–13.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Деформации при выдавливании цилиндрических стаканов. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2003, № 11, с. 23–33.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выдавливание цилиндрических изделий с центральным стержнем в донной части полости. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004, № 1, с. 34–40.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выбор коэффициентов трения для расчета технологических параметров штамповки выдавливанием. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 1, с. 23–26.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Общая теория осадки и высадки цилиндрических заготовок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 1, с. 82–104.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Расчет накопленных деформаций при выдавливании полых изделий. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 3, с. 3–9.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Анализ решений, выполненных методом конечных элементов. *Производство проката*, 2004, № 4, с. 3–11.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л., Абрамов Е. А. Комбинированное выдавливание полых цилиндрических изделий со сферическим дном. *Металлообработка*, 2002, № 3(9), с. 22–24.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л., Абрамов Е. А. Выдавливание полых цилиндрических изделий с наружным стержнем. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2003, № 3, с. 39–42.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л., Абрамов Е. А. Выдавливание сплошных ступенчатых изделий. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2003, № 6, с. 14–18.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л., Абрамов Е. А. Выдавливание полых цилиндрических изделий пуансоном с полусферическим торцом. *Механика и процессы управления. Технологии и машины обработки давлением*, 2003, с. 12–17.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выдавливание цилиндрических изделий с центральным стержнем в донной части полости. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004, № 1, с. 34–40.

Учебное издание

Воронцов Андрей Львович

**ТЕОРИЯ И РАСЧЕТЫ
ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

В двух томах

Том 1

Редактор *А. С. Водчиц*
Технический редактор *Э. А. Кулакова*
Художник *А. К. Ездовой*
Корректор *Р. В. Царева*
Компьютерная верстка *М. А. Гольдман*

В оформлении обложки использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Сертификат соответствия № РОСС RU. АЕ51. Н 16228 от 18.06.2012

Подписано в печать 10.03.14. Формат 70×100 1/16.

Усл. печ. л. 32,5. Тираж 500 экз.

Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1
baumanprint@gmail.com

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие:
Ю.А. Лавриненко, С.А. Евсюков, В.Ю. Лавриненко
«Объемная штамповка на автоматах»**



Год: 2014

Тип издания: Уч. пособие

Объем: 264 стр. / 16.5 п.л.

Формат: 60x90/16

ISBN: 978-5-7038-3786-3

На основе обобщения отечественного и мирового опыта приведен обзор прогрессивных технологических процессов холодной объемной штамповки на автоматах. Представлены основные этапы технологического процесса: выплавка стали и изготовление проволоки, входной контроль металла (проволоки), термическая обработка и подготовка поверхности проволоки, объемная штамповка деталей на автоматах, термическое упрочнение, нанесение покрытий на детали и др. Приведены примеры технологических переходов получения штамповкой конкретных деталей и чертежи рабочих частей штампов, а также даны рекомендации по их расчету.

Содержание пособия соответствует курсу лекций, читаемому в МГТУ им. Н.Э. Баумана обучающимся по специальности «Машины и технологии обработки давлением».

Для студентов технических вузов; может быть полезно преподавателям, аспирантам, научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся разработкой технологии холодной объемной штамповки.

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

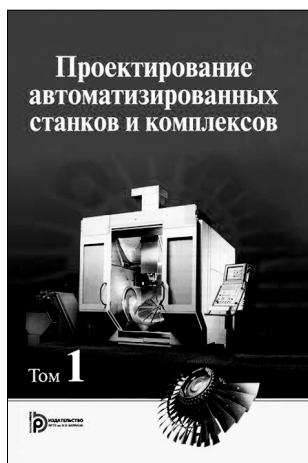
По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: press@bmstu.ru

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник под редакцией
П.М. Чернянского
«Проектирование автоматизированных станков
и комплексов». В двух томах**



Год издания: 2014
Тип издания: Учебник
Объем: 336 стр. / 27 п.л.
Формат: 70x100/16
ISBN: 978-5-7038-3810-5

В первом томе учебника изложены основы проектирования кинематической схемы, несущей системы, привода, надежности и устойчивости динамической системы, а также художественного проектирования станков. Рассмотрены принципы работы и устройства электрофизических и электрохимических станков, специальных станков с циклоидальной схемой обработки. Особое внимание уделено физически обоснованным методам расчета точности и устойчивости динамической системы станков, оптимальных размеров и жесткости шпиндельных узлов и др. Приведена теория и расчет точности станков с использованием упругофрикционной модели точности.

Во втором томе учебника рассмотрены вопросы проектирования и управления, микроэлектронные устройства, а также методы испытаний автоматизированных станков и комплексов. Большое внимание уделено выбору, проектированию и эксплуатации систем ЧПУ, подготовке управляющих программ, оптимизации и средствам автоматизированного проектирования.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Технологические машины и оборудование» и специальности «Проектирование технологических комплексов». Может быть полезен преподавателям и инженерам, работающим в области станкостроения.

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

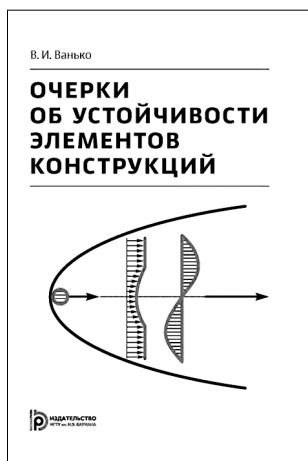
По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: press@bmstu.ru

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
В.И. Ванько
«Очерки об устойчивости элементов конструкций»**



Год издания: 2014
Тип издания: монография
Объем: 224 стр. / 14 п.л.
Формат: 60x90/16
ISBN: 978-5-7038-3919-5

Рассматриваются классические задачи о продольном изгибе упругопластического стержня; вводится понятие о корректности квазистатической постановки и выводится достаточное условие: постановка корректна, пока жесткость на изгиб наиболее нагружаемого изгибающим моментом поперечного сечения не станет меньше приложенной продольной силы (в безразмерных параметрах).

На основе кинематической схемы, разработанной совместно с С.А. Шестериковым, изучаются большие перемещения (вплоть до полного сплющивания) точек срединной поверхности цилиндрических оболочек (бесконечно длинных и конечной длины) под действием внешнего гидростатического давления. Для всех рассматриваемых постановок выводятся приближенные (асимптотические) формулы.

При изучении плоско-параллельных движений с тремя степенями свободы показано, что аэродинамическая неустойчивость есть неустойчивость по Ляпунову положений равновесия профиля. Полученное достаточное условие, так же как и классическое, инвариантно относительно механических свойств конструкции. Приводятся многочисленные приложения упомянутых исследований.

Книга будет полезной студентам и специалистам, занимающимся математическим моделированием поведения конструкций.

Информацию о других новых книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:
телефон: 8 499 263-60-45;
факс: 8 499 261-45-97
e-mail: press@bmstu.ru

Воронцов А. Л.

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В двух томах

Том 2

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение»*

 **ИЗДАТЕЛЬСТВО**
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Москва
2014

УДК 621.735.043:621.983.1:621.777.24
ББК 34.623.4
В75

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *Б.А. Романцев*
д-р техн. наук, профессор *В.Н. Сублич*

Воронцов А. Л.

В75 Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие : в 2 т. / А. Л. Воронцов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
ISBN 978-5-7038-3916-4

Т. 2. – 441, [7] с. : ил.
ISBN 978-5-7038-3918-8

Во втором томе учебного пособия рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов комбинированного выдавливания, радиального выдавливания, выдавливания с комбинированным нагружением, осадки, высадки, прошивки, вытяжки с утонением стенки, контурной осадки, калибровки, закрытой объемной штамповки, чеканки, формовки, секционной штамповки, дорнования, а также специальные операции гибки волокнистых композиционных материалов, сжатия порошковых заготовок в закрытой матрице и осадки малопластичных материалов в оболочках. Приведены формулы и методы расчета основных технологических параметров различных способов волочения труб и прутков. Изложен метод функции напряжений.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для студентов, аспирантов и преподавателей, обучающихся по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование» и специальности «Машины и технология обработки металлов давлением», а также инженерно-технических и научных работников, специализирующихся в области обработки металлов давлением.

УДК 621.735.043:621.983.1:621.777.24
ББК 34.623.4

В оформлении обложки использованы материалы сайта www.puresugijyutsu.com

ISBN 978-5-7038-3918-8 (т. 2)
ISBN 978-5-7038-3916-4

© Воронцов А. Л., 2014
© Оформление Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 9. Комбинированное выдавливание	5
9.1. Выдавливание с раздачей заготовки	5
9.2. Выдавливание стаканов со сферическим дном.....	14
9.3. Выдавливание стаканов с двусторонней полостью.....	19
9.4. Выдавливание стаканов с внутренним стержнем.....	23
9.5. Выдавливание стаканов с наружным стержнем	36
Глава 10. Радиальное выдавливание	42
10.1. Выдавливание сплошной заготовки.....	42
10.2. Напряженное состояние при выдавливании трубной заготовки.....	43
10.3. Деформированное состояние заготовки	49
10.4. Утяжина при выдавливании трубной заготовки.....	58
10.5. Давление на стенку контейнера.....	62
10.6. Прогнозирование разрушения	63
Глава 11. Выдавливание с комбинированным нагружением	65
11.1. Выдавливание стаканов с активными силами трения.....	65
11.2. Кинематическое состояние заготовки и оптимальная скорость перемещения матрицы	71
11.3. Выдавливание стаканов с противонапряжением.....	75
11.4. Выдавливание стаканов с кручением.....	77
11.5. Работа деформирования и прочность пуансона при традиционном выдавливании и выдавливании с кручением	90
11.6. Выдавливание сплошных стержней с кручением.....	93
Глава 12. Осадка	100
12.1. Осадка сплошных цилиндрических заготовок.....	100
12.2. Осадка заготовок с прочностной неоднородностью.....	115
12.3. Осадка полых заготовок на оправке	119
12.4. Осадка полых заготовок в матрице	123
12.5. Свободная осадка полых заготовок.....	130
12.6. Осадка с кручением	147
12.7. Управление формоизменением при осадке	156
12.8. Форма боковой поверхности заготовки при осадке	170
12.9. Макроструктура заготовки и зона затрудненной деформации при осадке	182
Глава 13. Высадка	190
13.1. Высадка сплошных стержней.....	190
13.2. Прогнозирование разрушения при высадке	195
13.3. Высадка изделий сложного профиля	204
13.4. Высадка полых заготовок на оправке	212

Глава 14. Прошивка	222
14.1. Закономерности прошивки	222
14.2. Стадия осадки заготовки	226
14.3. Образование вогнутости на верхнем торце заготовки	229
14.4. Стадия прошивки с уменьшением высоты заготовки	235
14.5. Стадия прошивки с увеличением высоты заготовки	243
14.6. Примеры практических расчетов	248
14.7. Прошивка на подкладном кольце	262
14.8. Прошивка полым прошивном	263
Глава 15. Вытяжка с утонением стенки	272
15.1. Вытяжка через одну матрицу	272
15.2. Оптимальные углы конусности матрицы	280
15.3. Вытяжка через две матрицы	283
15.4. Вытяжка через три матрицы	285
15.5. Прогнозирование разрушения	287
15.6. Вытяжка по внутренней поверхности	289
Глава 16. Дополнительные формоизменяющие операции	298
16.1. Контурная осадка	298
16.2. Калибровка. Закрытая объемная штамповка	315
16.3. Чеканка	324
16.4. Формовка	326
16.5. Секционная штамповка	328
16.6. Дорнование	336
Глава 17. Волочение	346
17.1. Волочение сплошных стержней	346
17.2. Волочение труб на короткой оправке	353
17.3. Волочение труб на длинной оправке	359
17.4. Безоправочное волочение	360
17.5. Практические расчеты напряжения волочения труб	360
17.6. Искривление труб при волочении	366
Глава 18. Специальные операции	370
18.1. Гибка волокнистых композиционных материалов	370
18.2. Сжатие пористых заготовок в закрытой матрице	376
18.3. Осадка малопластичных материалов в оболочках	381
18.4. Осадка малопластичных материалов в поясах	391
18.5. Осадка малопластичных материалов без обжатия оболочек	398
Глава 19. Метод функции напряжений	404
19.1. Общие положения метода	404
19.2. Напряженное состояние цилиндрической матрицы при сложном нагружении	407
19.3. Пластическая деформация полого цилиндра, нагруженного внутренним давлением	409
19.4. Изгиб широкой полосы	411
19.5. Сжатие длинной прямоугольной полосы	414
19.6. Осадка цилиндрической заготовки	415
19.7. Радиальное выдавливание цилиндрической заготовки	417
19.8. Выдавливание цилиндрического стакана	420
<i>Литература</i>	425
<i>Приложения</i>	431

КОМБИНИРОВАННОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ

9.1. Выдавливание с раздачей заготовки

Комбинированное выдавливание – выдавливание, при котором одновременно выполняется несколько операций, при этом металл имеет различные направления течения, что приводит к снижению удельной силы по сравнению с удельной силой при традиционном выдавливании.

При выдавливании с раздачей заготовки в направлении истечения металла между неподвижными пуансоном и матрицей (рис. 9.1, *a*), удельные силы деформирования значительно снижаются. Недостатки такого способа – сложность штамповочной оснастки и проблема съема выдавленного стакана с неподвижного пуансона.

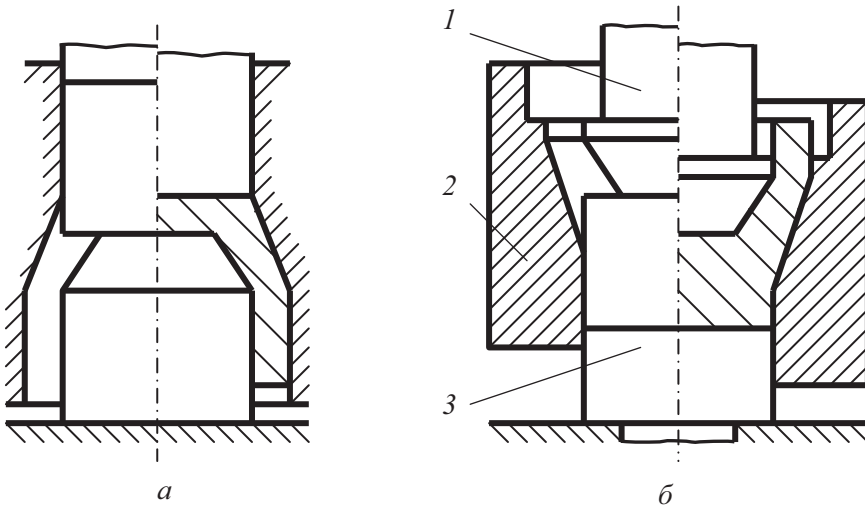


Рис. 9.1. Схемы выдавливания с раздачей заготовки в неподвижной (а) и движущейся (б) матрицах:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – выталкиватель

РАДИАЛЬНОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ

10.1. Выдавливание сплошной заготовки

Радиальное выдавливание – операция, при которой происходит увеличение диаметра заготовки на части ее высоты путем вытеснения материала в радиальную полость, расположенную по периметру боковой поверхности заготовки. Радиальное выдавливание применяется для изготовления изделий типа стержней или труб с поперечными выступами (рис. 10.1, а) или фланцами (рис. 10.1, б).

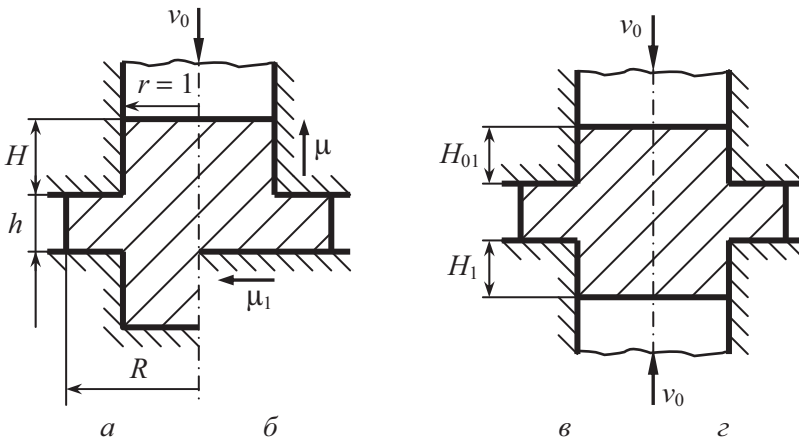


Рис. 10.1. Схемы одностороннего (а, б) и двустороннего (в, з) радиального выдавливания сплошной заготовки

При перемещении материала заготовки в зону деформации с одной стороны радиальное выдавливание называется односторонним (см. рис. 10.1, а, б), а при симметричном перемещении материала с двух сторон – двусторонним (рис. 10.1, в, з).

Общее определение напряженного состояния заготовки при радиальном выдавливании будет изложено в разд. 10.2. Ниже приведены частные результаты, относящиеся к радиальному выдавливанию сплошной заготовки.

ВЫДАВЛИВАНИЕ С КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРУЖЕНИЕМ

11.1. Выдавливание стаканов с активными силами трения

Выдавливание с комбинированным нагружением – выдавливание, при котором к заготовке прикладывают дополнительные по сравнению с традиционным выдавливанием виды нагрузки.

Выдавливание с активными силами трения – выдавливание, при котором к боковой поверхности заготовки прикладывают силы трения, способствующие истечению выдавливаемого материала.

В ряде случаев область применения традиционного холодного выдавливания деталей типа стаканов на практике ограничена большой действующей на пуансон удельной силой. Указанный недостаток, сдерживающий распространение применения операции, может быть уменьшен путем осуществления выдавливания в штамповочном инструменте, конструкция которого обеспечивает изменение направления сил контактного трения на границе заготовки и матрицы.

Для этого при конструировании выталкивателя изделий из матрицы его диаметр выполняют равным внешнему диаметру выдавливаемого стакана. В такой конструкции штампа заготовка не опирается на дно матрицы, и матрица от отдельного привода может перемещаться вдоль внешней поверхности выдавливаемого стакана (рис. 11.1).

Если матрицу перемещают в направлении истечения металла в стенку стакана, силы трения на границе заготовки и матрицы становятся активными, способствующими истечению металла. При этом происходит разгрузка пуансона, и снижается неравномерность деформации в выдавленном изделии.

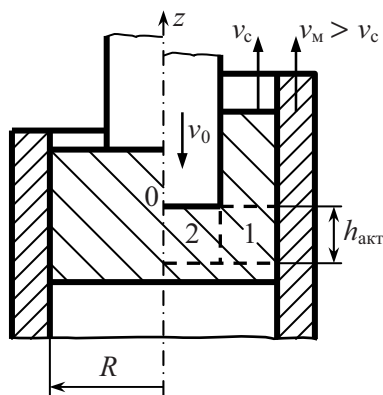


Рис. 11.1. Схема выдавливания с активными силами трения

12.1. Осадка сплошных цилиндрических заготовок

Осадка – операция, при которой происходит увеличение площади поперечного сечения заготовки за счет уменьшения всей ее высоты (рис. 12.1, а, б).

Наличие сил трения торцов осаживаемой заготовки об инструмент приводит к переменности площади поперечного сечения по высоте (см. рис. 12.1, б), называемой для цилиндрических заготовок *бочкообразностью*. Бочкообразность обуславливает переменность деформированного состояния заготовки. Однако для определения среднего диаметра, необходимого для расчета параметров напряженного состояния и силы деформирования, с достаточной для практики точностью можно принять площадь поперечного сечения постоянной и применять расчетную схему, приведенную на рис. 12.1, в, з. В этой схеме использована цилиндрическая система координат ρ , θ , z с началом на неподвижном нижнем инструменте (см. рис. 12.1, з).

Кинематически возможная осевая скорость

$$v_z = -f(z) \quad (12.1)$$

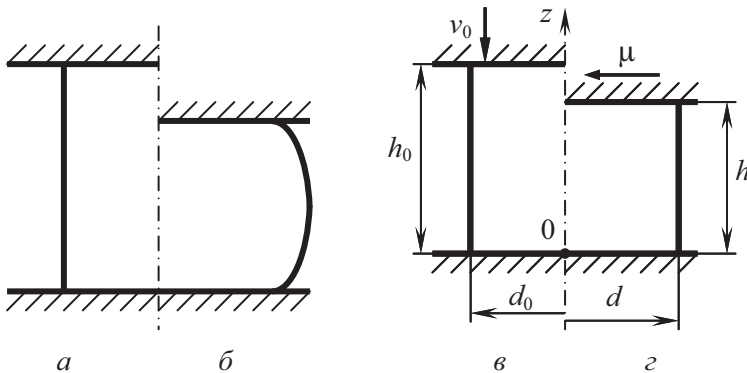


Рис. 12.1. Схема осадки заготовки (а, б) и расчетная схема осадки (в, з)

ВЫСАДКА

13.1. Высадка сплошных стержней

Высадка – операция, при которой происходит местное увеличение площади поперечного сечения заготовки за счет уменьшения части ее высоты.

Высадка фланца – операция, при которой происходит местное увеличение площади поперечного сечения концевой части заготовки за счет уменьшения высоты этой части (рис. 13.1, а).

Высадка поперечного утолщения – операция, при которой происходит местное увеличение площади поперечного сечения средней части заготовки за счет уменьшения высоты этой части (рис. 13.1, б).

До настоящего времени теоретическое определение параметров напряженного состояния и силы деформирования при высадке (силы высадки) сводили к процессу осадки и специально не рассматривали. Однако осадка и высадка имеют разные граничные условия, которые целесообразно учитывать для повышения строгости анализа и точности практических расчетов.

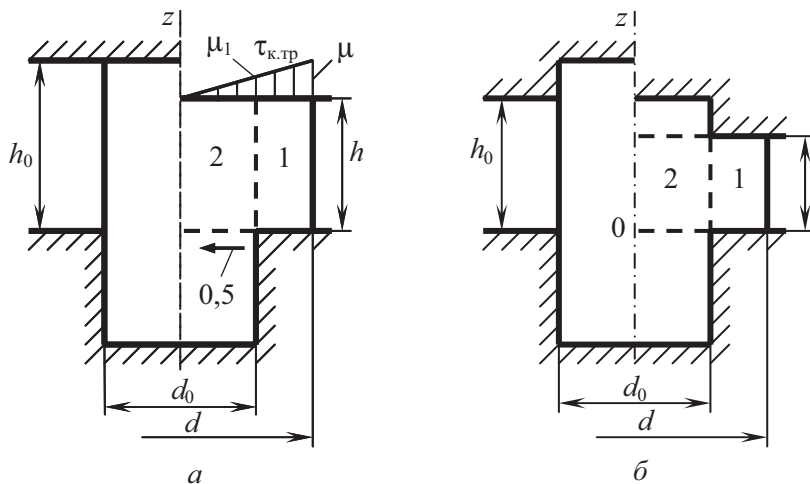


Рис. 13.1. Схемы высадки фланца (а) и высадки поперечного утолщения (б)

ПРОШИВКА

14.1. Закономерности прошивки

Прошивка – операция получения полости в заготовке со свободной боковой поверхностью путем вытеснения материала в поперечном направлении (рис. 14.1). Пуансон для прошивки также называют **прошивнем**. Если необходимо получить сквозное отверстие, то после прошивки выполняют пробивку, удаляя перемычку, образующую дно полости. Вырубленная перемычка называется **выдрой**.

В процессе прошивки заготовка значительно деформируется, что характеризуется сложным изменением ее первоначальных размеров и формы. В частности, происходит изменение высоты заготовки H и ее радиуса R , форма боковой поверхности существенно отличается как от цилиндрической, так и от конической.

Поскольку прошивка наиболее близка к операции выдавливания стаканов (ввиду сходства иногда называют закрытой прошивкой), в этой главе будут также использоваться геометрические

параметры, отнесенные к радиусу пуансона $r = 1$ (см. рис. 14.1).

Экспериментальные исследования прошивки, выполненные Е. И. Семеновым, С. Б. Кирсановой, Цшейле, а также А. Л. Воронцовым, позволяют сформулировать основные закономерности этого процесса.

1. В процессе прошивки наружный радиус верхнего торца заготовки остается постоянным (имеется лишь незначительное уменьшение вследствие изгиба стенки, рис. 14.2).

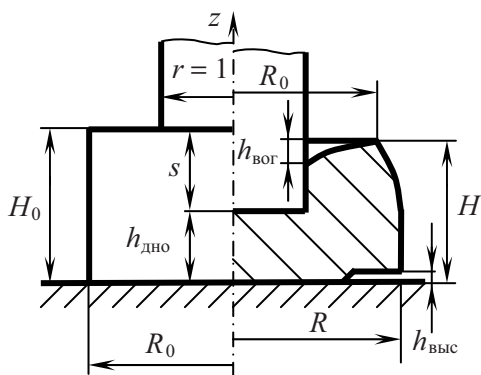


Рис. 14.1. Схема прошивки

ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ

15.1. Вытяжка через одну матрицу

Вытяжка с утонением стенки – операция принудительного уменьшения толщины стенки полой заготовки в зазоре между матрицей и пуансоном путем приложения последней силы к донной части заготовки (рис. 15.1, а). Вытяжку с утонением стенки иногда также называют *протяжкой*.

Заготовка для вытяжки с утонением стенки в листовой штамповке осуществляется с помощью вытяжки без утонения, а в малоотходной штамповке – с использованием операций выдавливания, которые позволяют получить большое разнообразие форм и размеров донной части заготовки. Последняя может иметь различную толщину по отношению к толщине стенки, заходный участок различной протяженности, разную конфигурацию внутреннего сопряжения

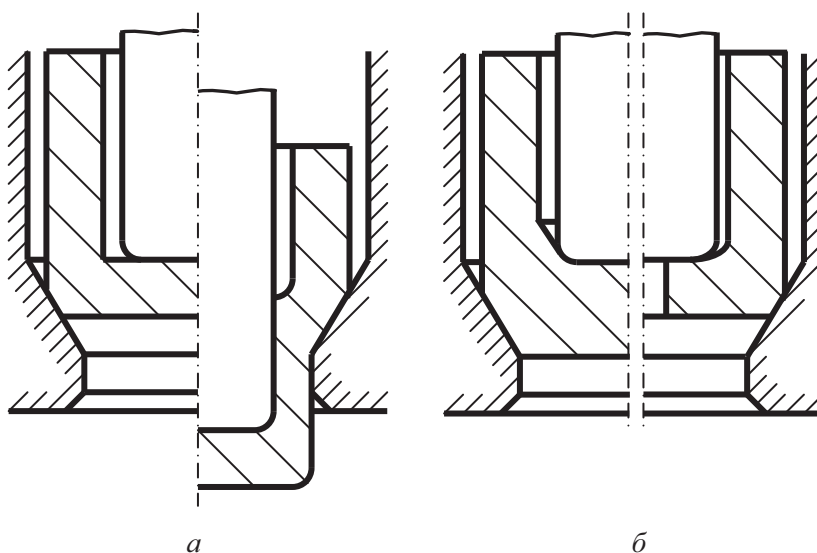


Рис. 15.1. Схема вытяжки с утонением стенки (а) и виды геометрии донной части вытягиваемой заготовки (б)

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФОРМОИЗМЕНЯЮЩИЕ ОПЕРАЦИИ

16.1. Контурная осадка

Контурная осадка – операция, при которой происходит увеличение площади поперечного сечения заготовки за счет уменьшения ее высоты только на периферийной части этого сечения (рис. 16.1). Контурную осадку также называют осадкой на плите с отверстием или осадкой в подкладных кольцах.

Поскольку при контурной осадке металл имеет несколько направлений возможного течения, это обуславливает значительную неопределенность конечного формоизменения заготовки. В наиболее общем случае процесс контурной осадки включает в себя следующие стадии:

- обыкновенная осадка без затекания металла в отверстие плиты (рис. 16.2, а);
- осадка со смещением в отверстие центральной области заготовки как жесткого целого (рис. 16.2, б), т. е. с неизменностью высоты этой части;
- осадка с выдавливанием металла в отверстие плиты (рис. 16.2, в), т. е. с увеличением высоты центральной части h_2 по сравнению с исходной высотой h_1 .

В последнем случае возникает граница раздела течения металла, характеризующаяся радиусом R_f . Ближе к центру от этой границы металл выдавливается в отверстие плиты, а ближе к периферии – осаживается. В зависимости от высоты и диаметра заготовки, диаметра отверстия в плите, а также коэффициента трения те или иные стадии контурной осадки могут отсутствовать.

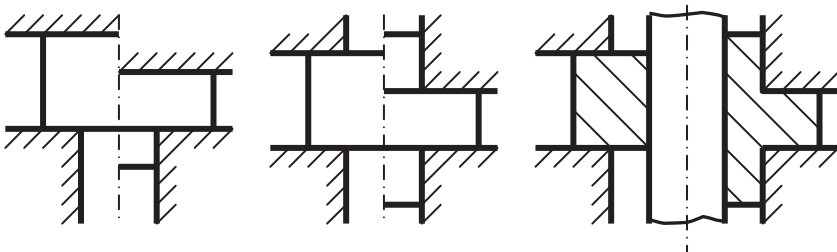


Рис. 16.1. Схемы контурной осадки

ВОЛОЧЕНИЕ

17.1. Волочение сплошных стержней

Определение напряжения и силы – один из наиболее важных вопросов теории и практики волочения, так как непосредственно связан с выбором допустимых степеней деформации за один проход, мощности и производительности волочильных станков. В связи с этим для определения напряжения было предложено много аналитических формул. Наиболее обоснованной считается формула, полученная И. Л. Перлиным, так как она выведена с наименьшим числом допущений по сравнению с другими формулами. Проанализируем лишь решение Перлина, опуская допущения, присущие большинству известных теоретических исследований¹.

1. В решении использовано приближенное уравнение равновесия, полученное, во-первых, не в частных производных, а во-вторых, для элемента, бесконечно малого лишь в одном направлении и конечного в двух других направлениях, что не соответствует современному уровню прикладной теории пластичности, уравнения которой построены для элемента, бесконечно малого во всех направлениях.

2. Для вывода приближенного уравнения равновесия и его последующего решения принято, что радиальные и осевые напряжения вдоль соответствующих поверхностей выделенного элемента одинаковы. Ссылка на осесимметричность деформационной зоны некорректна, так как, например, в осесимметричных задачах осадки, выдавливания, прошивки осевые и радиальные напряжения сильно изменяются во всех направлениях (см. разд. 4.1, 12.1, 14.4), т. е. осесимметричность никак не связана с постоянством напряжений.

3. В решении принято, что направления главных напряжений на контактной поверхности заготовки и волокна совпадают с направлением полных напряжений $\sigma_{\text{пол}}$ на этой поверхности. Это неверно, так как направления главных напряжений зависят не только от напряжений в рассматриваемой площадке, но в равной степени и от напряжений в перпендикулярной площадке, не учитываемых Перлиным. На основе точной формулы для определения направления

¹ Здесь сохранены обозначения, принятые в работе «Теория волочения», Москва, 1971.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

18.1. Гибка волокнистых композиционных материалов

В настоящее время интенсивно разрабатываются и используются композиционные материалы, армированные высокопрочными волокнами. Достоинство таких материалов – их высокая конструктивная эффективность, обусловленная высокими прочностными и упругими характеристиками при малом удельном весе. Однако низкая технологическая пластичность волокнистых композиционных материалов (ВКМ) в значительной степени затрудняет их широкое внедрение в промышленность. Одной из наиболее приемлемых технологических операций формоизменения ВКМ является гибка. При этом для предотвращения образования трещин и повышения предельного формоизменения необходимо осуществлять изгиб с наложением на ВКМ сжимающих напряжений.

Ниже рассмотрена одна из схем гибки со сжатием – гибка пуансоном с радиусным торцом путем вдавливания ВКМ в пластическую среду, в качестве которой использовался свинец, помещенный в контейнер с прямоугольным отверстием.

В целях определения граничных условий для исследования напряженного состояния ВКМ найдем параметры напряженного состояния пластической среды, полагая, что ВКМ является продолжением пуансона.

С учетом плоского деформированного состояния ($\beta = 1,155$) и образования наплыва при вдавливании заготовки пуансоном очаг пластической деформации среды можно представить схемой, показанной на рис. 18.1, а.

Радиальную скорость течения частиц среды зададим кинематически возможной функцией

$$v_p = f_1(\rho) \cos \theta, \quad (18.1)$$

удовлетворяющей граничным условиям $v_p = v_0 \cos \theta$ при $\rho = r$ и $v_p = 0$ при $\rho = R$.

Используя условие несжимаемости $\xi_p + \xi_\theta = 0$ и граничное условие $v_\theta = 0$ при $\theta = 0$, находим тангенциальную скорость движения частиц среды

$$v_\theta = -[\rho f_1'(\rho) + f_1(\rho)] \sin \theta. \quad (18.2)$$

МЕТОД ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

19.1. Общие положения метода

В обработке металлов давлением часто приходится решать задачи расчета на прочность инструмента и оборудования, определения силы деформирования и анализа распределения напряжений в обрабатываемой заготовке. При этом ввиду трудностей точного решения системы дифференциальных уравнений равновесия с определяющими уравнениями обычно вводятся упрощающие допущения, а близкая к реальной сложная схема нагружения заменяется простой. Например, методики расчета на прочность бандажированных матриц и контейнеров основаны на решении задачи Ламе, хотя известно, что, в частности при выдавливании, давление на стенку матрицы распределено вдоль ее образующей неравномерно. Иногда потеря точности вследствие введения упрощающих предпосылок приводит к тому, что результаты расчета не удовлетворяют возросшим требованиям производства в современных условиях.

В теории упругости высокоэффективным методом, позволяющим решать сложные задачи, является метод нахождения функции напряжений φ , удовлетворяющей уравнению совместности деформаций, с помощью которой дифференцированием определяются напряжения, тождественно удовлетворяющие уравнениям равновесия. Применительно к рассматриваемому методу уравнение совместности деформаций (неразрывности) записывается в виде

$$\Delta\Delta\varphi = 0, \quad (19.1)$$

где Δ – оператор Лапласа в соответствующей системе координат.

Запишем выражения напряжений через функцию φ в различных системах координат, тождественно удовлетворяющие соответствующим уравнениям равновесия, что легко проверить непосредственной подстановкой.

Для плоской задачи в прямоугольных координатах x и z (функция напряжений называется функцией Эри)

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}; & \sigma_z &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \\ \tau_{xz} &= -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z}; & \Delta &= \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (19.2)$$

ЛИТЕРАТУРА

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выбор коэффициентов трения для расчета технологических параметров штамповки выдавливанием. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 1, с. 23–26.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Общая теория осадки и высадки цилиндрических заготовок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 1, с. 82–104.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Анализ решений, выполненных методом конечных элементов. *Производство проката*, 2004, № 4, с. 3–11.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Расчет накопленных деформаций при выдавливании полых изделий. Ч. 1. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 3, с. 3–9.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Расчет накопленных деформаций при выдавливании полых изделий. Ч. 2. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 4, с. 7–13.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Теория выдавливания ступенчатых стержней. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 2, с. 86–108.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Общая теория осадки и высадки сплошной цилиндрической заготовки. Ч. 2. Высадка. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, № 4, с. 57–77.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Надежность метода конечных элементов. *Справочник. Инженерный журнал*, 2004, № 6, с. 13–22.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Физические закономерности и определение силовых параметров выдавливания полых цилиндрических изделий. Ч. 1. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 6, с. 3–8.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Физические закономерности и определение силовых параметров выдавливания полых цилиндрических изделий. Ч. 2. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 7, с. 3–11.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Учет неоднородности механических свойств и скорости деформации в расчетах процессов выдавливания. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 8, с. 3–10.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выдавливание цилиндрических стаканов полым пуансоном. Ч. 1. *Производство проката*, 2004, № 8, с. 19–29.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выдавливание цилиндрических стаканов полым пуансоном. Ч. 2. *Производство проката*, 2004, № 9, с. 33–39.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Выдавливание полых изделий с раздачей заготовки в движущейся матрице. *Вестник машиностроения*, 2004, № 10, с. 55–61.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Примеры определения технологических параметров выдавливания стаканов из упрочняющихся материалов. *Кузнечно-штамповочное производство*, 2004, № 11, с. 21–31.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Прогнозирование утяжин при штамповке. *Справочник. Инженерный журнал*, 2004, № 11, с. 29–35.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Анализ операции и расчеты при комбинированном выдавливании стаканов с внутренним стержнем. *Вестник Новгородского государственного университета*, 2004, № 26, С. 33–44.

Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Технологииковки и объемной штамповки. Ч. 1: *Объемная штамповка выдавливанием*. Москва, Машиностроение, 2005, 500 с.

Дмитриев В. Д., Елманов В. И., Шумилов Л. В. Исследование и совершенствование технологии производства труб для карданных валов автомобильной промышленности с целью повышения точности их геометрических размеров. *Отчет по НИР ВЗМИ № ГР 78075575855*, 1980, 68 с.

Журавлев А. З. *Основы теории штамповки в закрытых штампах*. Москва, Машиностроение, 1973, 222 с.

Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. *Элементы прикладной математики*. Москва, Наука, 1972, 592 с.

Иванов С. К., Ганаго О. А. Давление металла на стенки штампа при закрытой прошивке. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1969, № 3, с. 3–5.

Ильюшин А. А. Некоторые вопросы теории пластического течения. *Известия АН СССР*, 1958, № 2, с. 20–33.

Исаченков Е. И. *Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1978, 208 с.

Казаченок В. И. *Штамповка с жидкостным трением*. Москва, Машиностроение, 1978, 78 с.

Камке Э. *Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям*. Москва, Наука, 1976, 576 с.

Каплунов Б. Г., Одинокое В. И., Скопечный А. И. Напряженно-деформированное состояние металла при горячей прошивке. Сообщение 1. *Известия вузов. Сер. Черная металлургия*, 1979, № 6, с. 48–51.

Качанов Л. М. *Основы теории пластичности*. Москва, Наука, 1969, 420 с.

Семенова Е. И., Навроцкий Г. А., ред. Ковка и штамповка. Справочник. Т. 3: *Холодная объемная штамповка*. Москва, Машиностроение. 1987, 384 с.

Ковка и штамповка цветных металлов. *Справочник*. Москва, Машиностроение, 1972, 232 с.

Колмогоров В. Л. *Напряжения, деформации, разрушение*. Москва, Металлургия, 1970, 229 с.

Кроха В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. Москва, Машиностроение. 1968. 131 с.

Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. *Справочник*. Москва, Машиностроение, 1980, 157 с.

Кузнецов В. П., Закуренов Е. А., Рогожин В. Н. О холодном выдавливании полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1972, № 6, с. 5–8.

Кузнецов В. П., Ренне И. П., Рогожин В. Н. Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий из малоуглеродистой стали. Тула, 1976, 72 с.

Кузнецов Д. П. Напряженно-деформированное состояние при обратном выдавливании полых цилиндрических деталей. *Вестник машиностроения*, 1959, № 2, с. 40–44.

Лаптев А. М. Уплотнение пористых изотропных материалов в условиях плоской деформации. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1978, № 2, с. 108–112.

Леванов А. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П. *Контактное трение в процессах обработки металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1976, 416 с.

Логонов Ю. Н., Буркин С. П. Кинематические условия закручивания металла при прессовании через вращающуюся матрицу. *Известия вузов. Сер. Черная металлургия*, 1995, № 8, с. 38–41.

Малинин Н. Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. Москва, Машиностроение, 1975, 400 с.

Малинин Н. Н. *Технологические задачи пластичности и ползучести*. Москва, Высшая школа, 1979, 119 с.

Микляев П. Г., Нешпор Г. С., Кудряшов В. Г. *Кинетика разрушения*. Москва, Металлургия, 1979, 279 с.

Митькин А. Н. *Определение усилий при холодном выдавливании*. Москва, НИИТавтопром, 1957, 17 с.

Могучий Л. Н. *Обработка давлением труднодеформируемых материалов*. Москва, Машиностроение, 1976, 272 с.

Богоявленский К. Н., Жолобов В. В., Лангихов А. Д., Постников Н. Н. *Обработка цветных металлов и сплавов давлением*. Москва, Металлургия, 1973, 471 с.

Овчинников А. Г. *Основы теории штамповки выдавливанием на прессах*. Москва, Машиностроение, 1983, 200 с.

Осадчий В. Я., Воронцов А. Л., Безносиков И. И. *Теория и расчеты технологических параметров штамповки выдавливанием*. Москва, МГАПИ, 2001, 307 с.

Осадчий В. Я., Воронцов А. Л., Безносиков И. И. Напряженное состояние заготовки и силовые параметры при обратном выдавливании с кручением. *Известия вузов. Сер. Черная металлургия*, 1999, № 11, с. 39–46.

Осадчий В. Я., Воронцов А. Л., Безносиков И. И. Напряженное состояние металла при обратном выдавливании с кручением сплошного стержня. *Известия вузов. Сер. Черная металлургия*, 2001, № 5, с. 31–35.

Осадчий В. Я., Воронцов А. Л., Карпов С. М. Влияние эксцентриситета на искривление труб при волочении. *Сталь*, 2001, № 4, с. 48–49.

Охрименко Я. М., Тюрин В. А. *Теория процессовковки*. Москва, Высшая школа, 1977, 295 с.

Перлин И. Л., Ерманок М. З. *Теория волочения*. Москва, Металлургия, 1971, 448 с.

Перлин И. Л., Райтбарг Л. Х. *Теория прессования металлов*. Москва, Металлургия, 1975, 448 с.

Попов Е. А. *Некоторые варианты приближенного анализа операций обработки давлением. Машины и технология обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1973, с. 168–177.

Попов Е. А. *Основы теории листовой штамповки*. Москва, Машиностроение, 1977, 278 с.

Попов Е. А., Ковалев В. Г., Шубин И. Н. *Технология и автоматизация листовой штамповки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 480 с.

Потапов И. Н., Коликов А. П., Дряян В. М. *Теория трубного производства*. Москва, Металлургия, 1991, 424 с.

Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки. Москва, Машиностроение, 1988, 184 с.

Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование. Москва, Машиностроение, 1991, 320 с.

Прозоров Л. В. Холодное выдавливание тонкостенных изделий. Новые исследования в области кузнечной технологии. ЦНИИТмаш. Кн. 32. Москва, Машгиз, 1950, с. 87–96.

Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 2. Москва, Машгиз, 1958, 974 с.

Ренне И. П., Емельянова В. А., Иванова Э. А. О температурном эффекте при закрытой прошивке стальных поковок. *Тр. преподавателей и слушателей Тульского городского университета научно-технических знаний*. Тула, 1974, вып. 25, с. 51–61.

Ренне И. П., Подливаев Ю. В. Исследование технологических возможностей закрытой прошивки высокопрочных алюминиевых сплавов. *Кузнечное-штамповочное производство*, 1976, № 5, с. 7–9.

Рытиков А. М., Савкин В. П., Ламин А. Б. Волочение труб с нагревом за волокой. *Теория и практика процессов производства труб*. Науч. тр. Москва, ВЗМИ, 1976, т. 22, с. 180–185.

Савин Г. А. *Волочение труб*. Москва, Металлургия, 1993, 335 с.

Семенов Е. И. *Ковка и объемная штамповка*. Москва, Высшая школа, 1972, 352 с.

Смирнов В. С. *Теория обработки металлов давлением*. Москва, Металлургия, 1973, 496 с.

Смирнов-Аляев Г. А. *Сопrotивление материалов пластическому деформированию*. Ленинград, Машиностроение, 1978, 368 с.

Смирнов-Аляев Г. А., Чикидовский В. П. *Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением*. Ленинград, Машиностроение, 1972, 370 с.

Соколовский В. В. *Теория пластичности*. Москва, Высшая школа, 1969, 608 с.

Сопочкин С. А. Определение коэффициентов в теории пластичности пористых материалов. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1981, № 9, с. 10–14.

Сопочкин С. А. Напряженное состояние пористой заготовки при деформировании в закрытой матрице. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1982, № 3, с. 117–123.

Степанский Л. Г. Расчеты реактивных нагрузок на инструмент при обработке металлов давлением. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1978, № 5, с. 2–5.

Степанский Л. Г. *Расчеты процессов обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1979, 215 с.

Степин П. А. *Сопrotивление материалов*. Москва, Высшая школа, 1979, 312 с.

Сторожев М. В., Попов Е. А. *Теория обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1971, 424 с.

Сторожев М. В., Попов Е. А. *Теория обработки металлов давлением*. Москва, Машиностроение, 1977, 423 с.

Тарасевич Ю. Ф., Воронцов А. Л. Метод изучения формoизменения пор и напряженное состояние при пластической деформации кольцевой заготовки коническим пуансоном. *Производство проката*, 2001, № 12, с. 3–8.

Теория обработки металлов давлением. Москва, Металлургия, 1963, 672 с.

Осадчий В. Я., Вавилин А. С., Зимовец В. Г., Коликов А. П. *Технология и оборудование трубного производства*. Москва, Интернет Инжиниринг, 2001, 608 с.

Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов. Москва, Металлургия, 1992, 512 с.

Тимошенко С. П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. Москва, Наука, 1979, 560 с.

Томлёнов А. Д. *Теория пластического деформирования металлов*. Москва, Металлургия, 1972, 408 с.

Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. *Механика деформаций при обработке давлением*. Москва, Машиностроение, 1969, 504 с.

Унксов Е. П. *Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением*. Москва, Машгиз, 1955, 230 с.

Фельдман Г. Д. *Холодное выдавливание стальных деталей*. Москва, Машгиз, 1963, 188 с.

Феодосьев В. И. *Сопrotивление материалов*. Москва, Наука, 1970, 544 с.

Филимонов Ю. Ф., Позняк Л. А. *Штамповка прессованием*. Москва, Машиностроение, 1964, 188 с.

Навроцкий Г. А., ред. *Холодная объемная штамповка. Справочник*. Москва, Машиностроение, 1973, 496 с.

Чудаков П. Д., Коробкин В. Д. Обратное осесимметричное выдавливание упрочняющегося материала. *Прогрессивные технологические процессы обработки металлов давлением*. Воронеж, ЭНИКМАШ, вып. 24, 1971, с. 8–15.

Чумаченко Е. Н., Машкова Н. Н., Тулупов С. А. Применение конечно-элементного анализа к процессу прокатки в калибрах. *Вестник машиностроения*, 1998, № 3, с. 35–43.

Шнейберг А. М., Сергеев М. К., Зайцева И. Л. Силовые параметры обратного выдавливания с вращением пуансона. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1986, № 8, с. 128–132.

Шофман Л. А. *Основы расчета процессов штамповки и прессования*. Москва, Машгиз, 1961, 340 с.

Шофман Л. А. *Теория и расчеты процессов холодной штамповки*. Москва, Машиностроение, 1964, 375 с.

Эверхарт Д. *Холодное прессование металлов*. Москва, Машиностроение, 1968, 148 с.

Schmitt G. Die Ermittlung der Formänderungen beim Napf-Fliesspressen. *Industries-Anzeiger*, 1968, vol. 90, № 55, ss. 1241–1246.

Vorontsov A. L. Stress and kinematic state in reverse tubular blank extrusion and stepped punch extrusion. *Russian Engineering Research*, 1997, vol. 17, № 12, pp. 26–31.

Vorontsov A. L. Analysis of stress and kinematic states of solid and tubular workpieces in radial extrusion. *Russian Engineering Research*, 1998, vol. 18, № 3, pp. 51–54.

Vorontsov A. L. Analysis of the kinematic, stress and strain states of the material as a cylindrical punch penetrates a halfspace. *Russian Engineering Research*, 1998, vol. 18, № 7, pp. 42–48.

Vorontsov A. L. Calculating the accumulated deformations in extruding hollow cup-type articles. *Russian Engineering Research*, 1999, vol. 19, № 7, pp. 42–48.

Vorontsov A. L. The strain state of the workpiece in radial extrusion. *Russian Engineering Research*, 1999, vol. 19, № 10, pp. 40–46.

Vorontsov A. L. Analysis of extrusion of hollow articles by a spherical, Face cylindrical punch. *Russian Engineering Research*, 1999, vol. 19, № 11, pp. 56–63.

Vorontsov A. L. Workpiece stress state in hollow-article extrusion by cylindrical punch with radiused edges. *Russian Engineering Research*. 2000, vol. 20, № 9, pp. 31–36.

Vorontsov A. L. Analytic study of combined discharge of dissimilar materials in the extrusion of rod-like articles. *Russian Engineering Research*, 2000, vol. 20, № 11, pp. 47–51.

Vorontsov A. L. Kinematic state of the workpiece in extruding hollow articles. *Russian Engineering Research*, 2002, vol. 22, № 3, pp. 53–57.

Vorontsov A. L. Account for the nonuniformity of the mechanical properties and the deformation rate in the calculations of the pressure working processes. *Russian Engineering Research*, 2003, vol. 23, № 6, pp. 62–69.

Воронцов А. Л. (СССР). *Способ изготовления деталей типа стаканов и устройство для его осуществления*. А.с. № 1238877 МКИ В 21 К 21/00, опубл. 23.06.86, бюл. № 23.

Воронцов А. Л., Ляняшин В. Б., Развалов Г. А. (СССР). *Штамп для изготовления симметричных ступенчатых деталей*. А.с. № 1473892, МКИ В 21 J 13/02, опубл. 23.04.89, бюл. № 40.

Воронцов А. Л. (СССР). *Инструментальный узел к штампам, преимущественно для выдавливания*. А.с. № 1263418 СССР, опубл. 15.10.86, бюл. № 38.

Дмитриев А. М., Дмитренко Д. А., Гришин В. М., Луговой В. А., Киреев А. Ю. (СССР). *Способ изготовления полых цилиндрических деталей*. А.с. № 1622070 СССР, опубл. 23.01.91, бюл. № 3.

Учебное издание

Воронцов Андрей Львович

**Теория и расчеты
процессов обработки металлов давлением**

В двух томах

Том 2

Редактор *А. С. Водчиц*
Технический редактор *Э. А. Кулакова*
Художник *А. К. Ездовой*
Корректор *Р. В. Царева*
Компьютерная верстка *М. А. Гольдман*

В оформлении обложки использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Сертификат соответствия № РОСС RU. АЕ51. Н 16228 от 18.06.2012

Подписано в печать 10.03.14. Формат 70×100 1/16.

Усл. печ. л. 32,5. Тираж 500 экз.

Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1
baumanprint@gmail.com