

В.А. КОСТЫШЕВ, Ф.В. ГРЕЧНИКОВ

**МЕТОДЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ
ПРОФИЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК
РАСКАТКОЙ**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.А. КОСТЫШЕВ, Ф.В. ГРЕЧНИКОВ

МЕТОДЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ
ПРОФИЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК
РАСКАТКОЙ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 004.9(075)
ББК 32.79
К 726



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: В. Ю. Арышенский, Н. Д. Проничев

Костышев В.Ю.

К 726 Методы формоизменения профильных кольцевых заготовок раскаткой / В.Ю. Костышев, Ф.В. Гречников. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 180 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0656-8

Представлено описание теории процесса расчета кольцевых заготовок, кинетика течения металла в очаге деформации при раскатке, описаны основные технологические параметры расчета колец и формоизменения металла в калибрах сложной формы применительно к кольцевым заготовкам авиационных двигателей.

Учебное пособие предназначено для студентов металлургического факультета, обучающихся по специальностям "Обработка металлов давлением", "Авиационные двигатели и энергетические установки".

УДК 004.9(075)
ББК 32.79

ISBN 978-5-7883-0656-8

© В.А. Костышев,
Ф.В. Гречников., 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

Учебное издание

**Костышев Вячеслав Александрович,
Гречников Федор Васильевич**

**МЕТОДЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ
ПРОФИЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК
РАСКАТКОЙ**

Учебное пособие

Технический редактор В. Р. Каргин
Редакторская обработка Н. С. Куприянова
Корректорская обработка Е. А. Ларионова
Доверстка В. С. Теплова

Подписано в печать 05.12.07. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 5,25.
Тираж 120 экз. Заказ . ИП-ж126/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК.....	6
1.1. Технологические схемы изготовления кольцевых профилей авиационных двигателей.....	6
1.2. Обзор и анализ исследований формоизменения профильных раскатных колец авиационных двигателей.....	10
1.3. Очаг деформации при раскатке колец.....	10
1.4. Термомеханические параметры производства кольцевых профилей авиационных двигателей.....	12
1.5. Влияние анизотропии на эксплуатационные характеристики материала раскатных колец авиационных двигателей.....	12
2. КИНЕТИКА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСКАТКЕ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	15
2.1. Экспериментальное исследование очага деформации при раскатке кольцевых профилей авиационных двигателей и разработка физической модели строения очага деформации.....	16
2.1.1. Определение напряженно-деформированного состояния очага деформации процесса раскатки колец методом равнопрочных вставок.....	16
2.1.2. Изучение очага деформации процесса раскатки колец металлографическим методом.....	27
2.1.3. Исследование субструктурного состояния очага деформации процесса раскатки колец.....	30
2.2. Теоретический анализ напряженного состояния в очаге деформации при раскатке колец авиационных двигателей с учетом теории ортотропных сред.....	33
2.2.1. Напряженное состояние в очаге деформации при раскатке колец авиационных двигателей.....	33
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	37
3.1. Разработка зависимости, описывающей глубину зон распространения интенсивной деформации при раскатке колец авиационных двигателей.....	37
3.2. Исследование влияния геометрических факторов на величину обжатия при раскатке колец авиационных двигателей.....	42
3.3. Кинетика и геометрические параметры процесса раскатки колец авиационных двигателей.....	48
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЛИБРАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ КАЛИБРОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	52

4.1. Сортамент кольцевых профилей авиационных двигателей.....	52
4.2. Исследование схем калибровок при раскатке профильных кольцевых заготовок авиационных двигателей.....	55
4.3. Расчеты калибровок для колец авиационных двигателей швеллерного, балочного и таврового профилей.....	61
4.3.1. Методика расчета калибровок кольцевых заготовок швеллерного типа по способу совместной раскатки со сверткой	62
4.3.2. Методика расчета калибровок кольцевых заготовок балочного и швеллерного типа по способу балки	68
4.3.3. Методика расчета калибровок кольцевых заготовок по способу тавра.....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	77

ВВЕДЕНИЕ

Современные концепции технического прогресса ставят перед машиностроителями ряд задач по снижению материалоемкости машин, повышению их качества и надежности. Реализация конструкторских разработок в авиационном двигателестроении с минимальными запасами прочности и использованием весьма дорогостоящих сплавов при создании прогрессивных процессов обработки металлов давлением требует также решения двуединой проблемы обеспечения высокой надежности деталей и экономичности технологий.

В современных конструкциях авиационных двигателей широко используются детали, изготовленные из штамповок, листа, поковок, раскатных колец, материалом для которых служат высокопрочные никелевые, хромоникелевые, алюминиевые и другие сплавы.

Эти материалы в большинстве своем относятся к труднодеформируемым сплавам, которые характеризуются сложным составом и невысокими технологическими свойствами. Это создает значительные трудности при изготовлении полуфабрикатов и изделий из них, а в ряде случаев приводит к необходимости создания новых технологических процессов.

Весьма ответственными деталями в авиационных двигателях являются тонкостенные кольцевые детали ротора и статора, имеющие сложную конфигурацию. Работоспособность этих деталей определяется уровнями их кратковременной прочности, ползучести, усталости. Эти эксплуатационные характеристики непосредственно зависят от структурного состояния деталей, которое формируется при горячей обработке металлов давлением.

Используемые до недавнего времени способы получения бесшовных кольцевых заготовок не позволяли получать высокого коэффициента использования металла. Физико-механические свойства материала колец были также невысоки. Такое состояние объясняется, прежде всего, получением значительной структурной неоднородности при использовании нерациональных схем деформирования металла.

При решении указанной проблемы формообразования кольцевых профилей особенно важными являются рассмотрение напряженно-деформированного состояния и формирование структуры в очаге деформации, так как они определяют величину сопротивления деформации и способность металла к длительной работе.

Здесь необходимо отметить, что теоретические вопросы по изучению напряженно-деформированного состояния, кинетике течения металла в очаге деформации при процессе раскатки колец изучены недостаточно. Отсутствуют методы расчета основных параметров формоизменяющих процессов, а также способы получения бесшовных тонкостенных профильных кольцевых заготовок.

В данной работе рассмотрено напряженно-деформированное состояние и формирование структуры на стадиях обработки профильных кольцевых заготовок.

Для разработки технологического процесса приведены закономерности явлений, происходящих в кольце при его формоизменении, и на этой основе предложены температурно-скоростные, деформационные, геометрические и силовые параметры. Описаны способы калибровки профильных колец по многокалиберной схеме.

1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК

В современных конструкциях авиационных двигателей одними из многочисленных деталей являются кольца, объем которых составляет около 15 % веса двигателя. Кольцевые детали выполняют весьма важную роль в работе двигателя. Достаточно отметить, что при разрушении промежуточного кольца дисков компрессора неизбежна поломка двигателя с опасными последствиями для самолета. Кольца работают в условиях высоких нагрузений от центробежных, осевых сил и сил термического расширения, возникающих при работе собственно кольца, и от воздействия сопрягаемых с ним деталей, а также претерпевают определенные физико-химические изменения, приводящие иногда к потере их работоспособности.

Специфика конструирования авиадвигателей, требования их эксплуатационной надежности, технологичности и экономичности предъявляют, как указано в работах Н.Д.Кузнецова, М.А.Елизаветина, Б.И.Костецкого, К.Н.Михайлова и др., к металлургическим процессам и, в частности процессам обработки металлов давлением, особые требования по эффективности и качеству [1...4].

1.1. Технологические схемы изготовления кольцевых профилей авиационных двигателей

Разнообразие геометрических форм профилей, их габаритных размеров, требований к их качеству позволяют использовать в современном двигателестроительном производстве множество технологических схем изготовления кольцевых профилей, которые по своему назначению применяются только для изготовления статорных колец, или только для роторных колец, или для тех и других одновременно.

Все известные технологические схемы производства кольцевых заготовок авиационных двигателей можно подразделить на две основные группы: получение кольцевых заготовок из листа и раскаткой из ковальной заготовки. Кроме того, в данной главе приведены перспективные методы получения раскатных колец из полых литых и катаных заготовок.

Наиболее часто встречаются технологические схемы получения колец формовкой из листа и раскаткой из цельной заготовки (рис. 1.1, 1.2, 1.3, 1.4)[5...7].

Для изготовления колец статора широко применяется технологическая схема получения колец формовкой из листовой заготовки методами осадки, отбортовки, ротационного раската и др. (рис. 1.1). По разработке и совершенствованию этой схемы большие работы выполнили К.Н.Богоявленский, В.Ф.Баркая, Ю.Н.Алексеев, В.И.Ершов, М.П.Найденов, Г.В.Проскуряков, М.П.Назарцев и др.[8...17]. Значительные достижения в этой области имеют НИАТ, ВИЛС, моторостроительные предприятия городов Самары, Казани, Уфы.

Наряду с определенной универсальностью получения профиля кольца, как по оборудованию, так и по технологии обработки, данная схема обладает некоторыми недостатками. Это выражается в их пониженной экономичности и недостаточно

высоком качестве готовой продукции. Так, коэффициент выхода годного часто не превышает 0,2. Отходы, в основном складываются из потерь при раскрое и механической обработке. Необходимо отметить наличие значительной трудоемкости из-за весьма длинной технологической цепочки, а также за счет использования малопродуктивных механической и слесарной обработок. Шов в сварных кольцах по своей структуре всегда имеет резкое отличие от основного материала. Поэтому механические свойства в месте сварного шва ниже, чем в основной части кольца. Так, выносливость снижается на 40...50%.

Это объясняется тем, что процесс сварки является металлургическим процессом, геометрическая зона сварки представляет собой расплавленную жидкую массу, процесс кристаллизации в этом месте происходит заново. Если это жаропрочные сплавы, то наряду с пористостью образуется неравномерность фазового состава и значительное количество первичных карбидов, ослабляющих границы зерен и повышающих хрупкость. Кроме того, зона шва обедняется легирующими элементами.

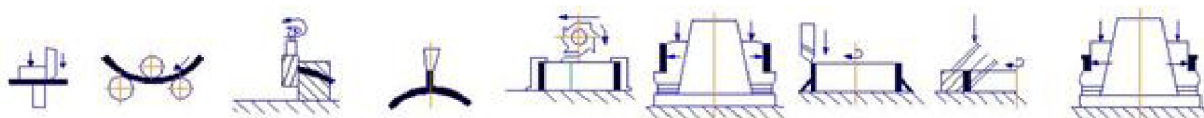


Рис. 1.1. Технологическая схема получения колец формовкой из листовой заготовки

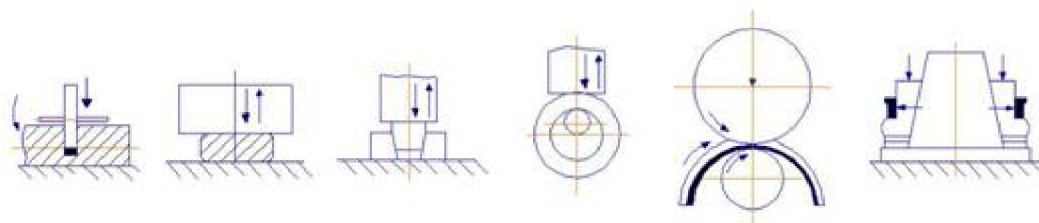


Рис. 1.2. Технологическая схема получения колец раскаткой из кованой заготовки

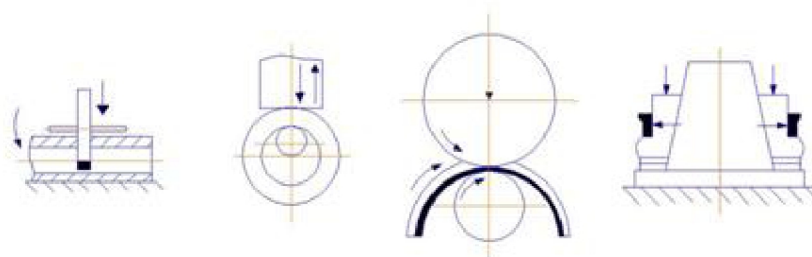


Рис. 1.3. Технологическая схема получения колец раскаткой из литой трубной заготовки

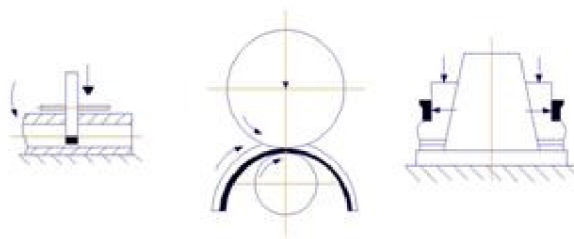


Рис. 1.4. Технологическая схема получения колец раскаткой из трубной катаной заготовки

При формоизменении металла колец в местах перехода деформированной зоны в недеформированную неизбежно имеют место критические деформации и, как следствие, после высокотемпературной обработки образуется крупное зерно.

При давящих операциях с многократным локальным разогревом до температуры горячей деформации и малой величиной дробной деформации в кольцах из титановых сплавов образуется грубая неоднородная структура, значительный альфированный слой.

Из рассмотренной технологической схемы производства профильных сварных колец видно, что наряду с пониженной ее экономичностью, кольца, полученные по этой схеме, не обеспечивают высоких требований эксплуатационной надежности и не могут быть использованы в наиболее ответственных элементах двигателя - роторах ГТД.

Технологическая схема получения колец, где основным формообразующим процессом является раскатка, по своему назначению более универсальна. Она используется для изготовления как роторных, так и статорных колец. Большие достижения в совершенствовании данной схемы имеют как отечественные организации ВИЛС, ВИАМ, НИИД, СНТК им. Н.Д.Кузнецова, так и зарубежные фирмы Wagner, Banning, Wymen-Gordon, Snekma, Grotnes и др. Значительные работы в этом направлении выполнили П.И.Полухин, А.И.Целиков, Л.П.Котельников, Т.Т.Шалимов, В.Н.Выдрин, В.Н.Зиновьев, В.Hawkyard, W.Johnson, H.S.Marczinski, S.T.Winship и др. [4, 18...58].

В настоящее время применяется схема изготовления бесшовных кольцевых профилей раскаткой из ковальной заготовки (рис. 1.2). Технологическая цепочка по данной схеме значительно короче предыдущей. Трудоемкость же ниже в 8... 10 раз. Здесь технологические отходы складываются из потерь при металлургическом переделе прутков - раскатное кольцо и при механической обработке. Однако несмотря на значительно меньшие потери при переделе прутков - раскатное кольцо, коэффициент выхода годного при этом не превышает 0,1...0,2. Это объясняется несовершенством имеющейся технологии раскатки, отсутствием процесса получения тонкостенных бесшовных профильных колец. Кроме этого, наблюдается значительная структурная неоднородность, что снижает эксплуатационную надежность деталей ГТД. Так, при использовании известной технологии раскатки колец методом выдавливания наблюдается существенная структурная неоднородность, что приводит к большой неравномерности механических свойств, при этом выносливость по сравнению с однородным мелкозернистым металлом

снижается на 20...30% [59]. В перспективе, при условии решения задач по получению тонкостенных фланцевых профилей, коэффициент выхода годного может быть увеличен до 0,35 и более.

Помимо отмеченного традиционного метода, направлением совершенствования схемы изготовления кольцевых цельнокатаных профилей авиационных двигателей может являться освоение процесса раскатки полых литых заготовок, полученных методом вытяжки из расплава. Материал при этом может быть использован весьма полно. Отходы могут иметь место только при резке труб на мерные заготовки и механической обработке. Коэффициент выхода годного, при условии решения задачи получения тонкостенных профильных колец, может достичь уровня 0,5 и выше. Значительно сокращается длительность кузнечных операций, а значит, и объем ручного труда.

Большая совместная работа по исследованию процесса получения полых слитков из жаропрочных сплавов и освоению процесса профильной раскатки колец из них проведена в ВИАМ, СНТК им. Н.Д.Кузнецова авторами С.А.Моисеевым, В.А.Калицевым, А.И.Мурзовым и др. [34...37, 56]. Но широкое внедрение этой схемы задерживается из-за наличия трудностей в освоении значительного количества типоразмеров исходных заготовок для раскатки профилей авиационных двигателей, существенных потерь металла и большой трудоемкости при обточке полых слитков.

Следующей перспективной технологической схемой производства бесшовных кольцевых профилей авиационных двигателей является производство колец раскаткой из трубной катаной заготовки. Коэффициент выхода годного при этом может быть доведен до 0,5 и выше. Величина ручного труда, как и в предыдущем случае, незначительна. Работы в этом направлении отсутствуют.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что процесс раскатки бесшовных колец является более рациональным по сравнению с процессом производства сварных колец. Но для повышения экономичности и эксплуатационной надежности кольцевых деталей ГТД необходимо разработать процесс получения тонкостенных бесшовных фланцевых кольцевых профилей с однородной структурой и высокими уровнями механических свойств.

Для успешного решения этой задачи необходимо в первую очередь рассмотреть процесс формоизменения профильных раскатных колец с выявлением механизма процесса раскатки и последующим определением основных технологических параметров процесса.

1.2. Обзор и анализ исследований формоизменения профильных раскатных колец авиационных двигателей

Производство колец на большинстве предприятий России и зарубежных стран проводится раскаткой на раскатных машинах в одном калибре [18, 22, 31, 52, 58]. Такая практика обеспечивает выпуск колец только простейшей формы. Получение же тонкостенных колец сложной формы с высокими фланцами при раскатке в одном калибре требует заготовок с высоким очагом деформации, что создает условие неравномерного истечения в очаге и получения разнотекстурной структуры. При указанном способе коэффициент использования металла, как уже отмечалось ранее, очень низок, он не превышает 0,2.

Для получения тонкостенных фланцевых кольцевых профилей с однородной структурой и высокими механическими свойствами используется многокалиберная раскатка колец путем последовательного многопереходного оформления профиля. Методы формоизменения по многокалиберной схеме базируются на известных работах как отечественных, так и зарубежных авторов: И.М.Павлова, Б.П.Бахтинова, М.М.Штернова, П.И.Полухина, И.Я.Тарновского, А.П.Виноградова, В.А.Шадрина, В.Е.Грум-Гржимайло, В.Тринкса, Э.Кирхберга, Тафеля и др. [65...76]. Но одновременно следует отметить, что методики калибровки валков, используемые в сортовой прокатке, не переносятся полностью на процесс раскатки колец, так как эти процессы имеют существенные отличия по форме и геометрии заготовки, соотношению диаметров валков, величине обжатий за проход, механизму деформации металла в очаге и т. д. Все это предусматривает необходимость изучения течения металла и заполнения калибров при многокалиберной раскатке кольцевых профилей и разработки новых методик их калибрования.

Для получения необходимой точности диаметральных и торцевых размеров кольцевых заготовок, обеспечивающих минимальный припуск на механическую обработку, кольца после высокотемпературной термической обработки подвергаются калибровке растяжкой или термокалибровке. Калибровку растяжкой проводят, как правило, на специализированных калибровочных прессах [50, 53, 54]. Этот метод калибрования обеспечивает точность диаметральных и торцевых размеров колец при диаметрах 1000...3000 мм \pm 1...3 мм [19...21, 50, 53, 56].

1.3. Очаг деформации при раскатке колец

При рассмотрении процесса формообразования кольцевых профилей авиационных двигателей особое внимание уделяется напряженно-деформированному состоянию и формированию структуры. Эти параметры определяют высокие уровни механических свойств металла.

Вопросы повышения ресурса и надежности двигателей находятся в неразрывной связи с прочностью и однородностью металла деформируемых заготовок. Высокая прочность и однородность металла раскатных колец обуславливается механизмом деформации металла, находящегося в зоне валков.

Изучением очага деформации при раскатке колец занимались П.И.Полухин,

Г.П.Остроушкин, А.И.Мурзов, К.Yagishita, K.Weber, W.Johnson и др. [23, 28, 38, 40, 45, 47, 49, 52, 77, 78]. Несмотря на большое число работ, посвященных неравномерности деформации, зависимость ее от формирования структуры изучена недостаточно. Отсутствуют как полное аналитическое описание, так и экспериментальные исследования явлений процессов, происходящих в очаге деформации, с учетом неравномерности деформации и внеконтактной деформации. Не создана физическая модель очага деформации при раскатке, которая достаточно близко отражала бы действительную картину деформации металла.

Руководствуясь классификацией И.М.Павлова [65], рассмотрим состояние работ по исследованию влияния геометрических параметров на неоднородность очага деформации, предварительно изучив труды по исследованию механики процесса раскатки.

Механику процесса раскатки исследовали: А.И.Целиков, П.И.Полухин, W.Johnson и др. [39, 40, 52, 57, 79]. Но вместе с тем до сих пор отсутствует зависимость, описывающая процесс раскатки, а также описание режимов обжатий по стадиям процесса.

Известно, что напряженно-деформированное состояние при процессе раскатки зависит от геометрических параметров инструмента и раскатываемого кольца [28, 39, 40, 52, 79]. Авторы этих работ А.И.Целиков, П.И.Полухин, Г.П.Остроушкин, W.Johnson, A.Matalis, W.Hawkyard, рассматривая влияние геометрических параметров очага деформации при раскатке, или не выделяли особенностей деформации со стороны внутреннего и наружного валков, или рассматривали ее только с учетом равенства длин дуг захвата. Из этого можно заключить, что исследования в этой области выполнены неполно. Следует выявить зависимости, характеризующие величины обжатий у наружного и внутреннего валков при определенных соотношениях между длинами дуг захвата. Кроме этого, необходимо исследовать, как меняется характер свойств материала в процессе деформации. Так, например, одной из особенностей является повышение в процессе деформирования анизотропии металла.

В последнее время выполнено множество работ по исследованию анизотропии применительно к процессам обработки металлов давлением авторами В.С.Смирновым, В.В.Шевелевым, С.П. Яковлевым, А.А.Бабарыко, У.Джонсоном, Т.Меллором, Ю.М.Арышенским и др. [80...88]. Однако эти работы посвящены изучению анизотропии в основном в листовых материалах, поэтому необходимо рассмотреть, как меняется характер анизотропии при объемных процессах, в частности при изготовлении колец. Важность этих исследований очевидна, так как роторные кольца авиационных двигателей, являясь высоконагруженными деталями, должны иметь достаточный запас прочности, а значит, при выполнении прочностных расчетов двигателей необходимо знать свойства материала в различных направлениях кольца.

Одним из этапов изготовления колец являетсяковка. Наиболее существенные работы в этой области выполнены С.И.Губкиным, М.В.Сторожевым, А.П.Чекмаревым, И.Я.Тарновским [89...92]. Однако в этих работах принимается допущение, что металл является однородным, изотропным и, кроме того, недостаточно полно описан характер течения металла в очаге деформации.

1.4. Термомеханические параметры производства кольцевых профилей авиационных двигателей

Разработка оптимальных режимов производства бесшовных экономичных и высококачественных кольцевых профилей для деталей авиационных двигателей имеет актуальное значение и требует решения ряда вопросов как по технологии, так и по металлосведению.

Состояние структуры, механические свойства металла и средние удельные давления раскатки определяют качество изделий. Разработка режимов обработки и рациональный их выбор всегда представляет большие трудности. Трудности заключаются в том, что материалы, из которых изготавливают кольца, обладают особыми физическими свойствами и трудно поддаются обработке.

Развитие современных методов обработки металлов давлением стало возможным на основе проведения экспериментальных исследований и развития физико-химической теории обработки металлов давлением.

Значительные успехи в развитии теоретических и практических работ были достигнуты благодаря научным изысканиям ученых России С.И.Губкина, И.М.Павлова, А.И.Целикова, С.Т.Кишкина, Н.М.Склярова, Н.И.Корнеева, А.Д.Томленова, А.П.Чекмарева, Я.М.Охрименко, Ф.Ф.Химушина [65, 79, 92, 92...94].

Термомеханические режимы производства раскатных колец авиационных двигателей имеют определенные особенности ввиду специфичности применяемых материалов и операций технологических процессов получения исходной заготовки под раскат, раскатки, термической обработки и калибровочных операций, обеспечивающих необходимую геометрическую точность. Исследованиям этих параметров посвящен ряд работ авторов В.Н.Зиновьева, В.А.Калицева, А.Н.Иванкиной, С.С.Соловцева, Е.Н.Сидоренко и др. [18, 24, 45, 31, 41, 60, 63].

Вместе с тем следует отметить, что эти работы неполно отражают термомеханические режимы раскатки профильных колец из современных жаропрочных никелевых, хромоникелевых, титановых и других сплавов, таких как, например, ХН68ВМТКЖ-ВД, ХН45ВМТЮБР-ИД, ВТ9, ВТ20. Такое состояние обуславливает необходимость исследования технологичности указанных сплавов, способности их к рекристаллизации и величин удельных давлений с целью определения оптимальных температурно-деформационных режимов раскатки роторных и статорных колец для улучшения структурно-фазового состояния, повышения механических свойств и коэффициента использования металла.

1.5. Влияние анизотропии на эксплуатационные характеристики материала раскатных колец авиационных двигателей

В 1971 году Головной совет по авиационной технике отметил, что быстрое развитие современной авиации требует дальнейшего совершенствования технологических процессов на основе важнейших достижений науки, в том числе и за счет более полного использования свойств обрабатываемого материала.

В связи с этим необходимы исследования поведения металла при различных стадиях технологической обработки. При этом следует исходить из того факта, что деформированные заготовки авиационных деталей - листы, трубы, профили, прутки, кольца и т. п. - обладают определенной анизотропией механических свойств. Анизотропия свойств металла во многом зависит от вида технологического процесса получения полуфабрикатов - волочение, прессование, прокатка, раскатка, ковка и т. п.

Известно, что в основе процесса получения колец раскаткой лежит прокатка. Поэтому, основываясь на факторах, влияющих на текстуру проката, рассмотренных в работе [81]:

граничные условия (состояние поверхности рабочих валков и слитка, форма калибров, смазка валков, температура проката);

геометрия очага деформации (отношение ширины и длины очага к его высоте);

механизм деформации (кристаллографическая ориентировка исходной заготовки, химический состав металла, чередование направлений преобладающей деформации),

можно утверждать, что текстура, а значит и анизотропия раскатных колец в основном зависит от схемы напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, т.е. от наличия высокого или низкого очага деформации. Так как исследованиями [77] установлено, что наличие высокого очага деформации не только снижает средний уровень механических свойств полуфабриката на 10... 15%, но и не обеспечивает стабильность текстуры вследствие резко неоднородного напряженного состояния в очаге деформации при проработке, можно утверждать необходимость обеспечения условий низкого очага деформации. Основываясь на этом принципе, следует рассмотреть поведение материала применительно к раскатке роторных колец при низком очаге деформации.

Для оценки влияния величин коэффициентов поперечной деформации на работоспособность конструкции рассмотрим напряженное состояние в полем однородном цилиндре под действием внутреннего и наружного давлений (рис. 1.5). Данная схема с достаточной степенью достоверности описывает условия работы проставки дисков компрессора, без учета осевых нагрузок. Проставка, при условии жесткой заделки, подвержена воздействию внутреннего и наружного давлений, причем внутреннее давление превышает наружное, а также воздействию центробежных сил и радиальных сил от термического расширения дисков. Результирующие этих сил будут располагаться по схеме, аналогичной распределению напряжений в цилиндре, нагруженном внутренним давлением.

Тогда рабочие напряжения в кольце с учетом анизотропии рассчитываются по формулам [109]

$$\sigma = \frac{pc^{n+1}}{1-c^{2n}} n \left(\frac{p}{r_2} \right)^{n-1} + \frac{p}{1-c^{2n}} nc^{n+1} \left(\frac{r_2}{p} \right)^{n-1}, \quad (1.1)$$

$$\sigma_p = \frac{pc^{n+1}}{1-c^{2n}} n \left(\frac{p}{r_2} \right)^{n-1} - \frac{p}{1-c^{2n}} nc^{n+1} \left(\frac{r_2}{p} \right)^{n-1},$$

где p - внутреннее давление;

c - отношение внутреннего и внешнего радиусов сечения,

$$c = \frac{r_1}{r_2},$$

$$n = \sqrt{\frac{E_\theta}{E_p}},$$

n - коэффициент,
 r - переменный радиус.

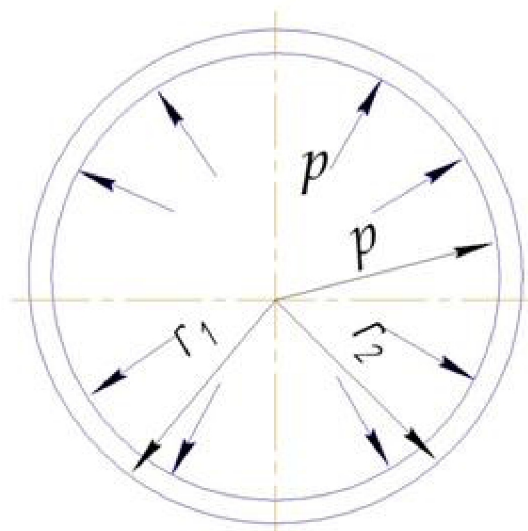


Рис. 1.5. Схема нагружения роторного промежуточного кольца при эксплуатации на двигателе

Используя уравнения (1.1) и условие пластичности в виде [86]

$$\sigma_\theta - \sigma_p = \frac{\sigma}{\sqrt{1 - \mu_{12}\mu_{21}}},$$

получим формулу для определения давления p на внутренней поверхности цилиндра:

$$p = \frac{\sigma_s(1 - c^{2n})}{\sqrt{1 - \mu_{12}\mu_{21}}[c^{2n}(n-1) + n + 1]} \quad (1.2)$$

Из анализа формулы (1.2) очевидно, что при возрастании коэффициентов поперечной деформации μ_{12} и μ_{21} допустимое давление p будет увеличиваться.

2. КИНЕТИКА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСКАТКЕ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основой процесса получения деформированных кольцевых заготовок авиационных двигателей является технологическая схема их производства, состоящая из выбора исходной заготовки, предварительного и основного формоизменяющего процесса, термической обработки и калибрующих операций, обеспечивающих необходимую геометрическую точность габаритных размеров колец. Основным формоизменяющим процессом является раскатка. Она определяет качественные и количественные характеристики процесса.

Рациональность технологического процесса раскатки определяется характером течения металла в очаге деформации. Другими словами, построение всего технологического процесса зависит от очага деформации при раскатке.

Как показано в литературном обзоре, приведенном ниже, механизм течения металла в очаге деформации при раскатке изучен недостаточно. Вместе с тем с целью расширения возможностей управления параметрами процессов и обеспечения оптимальной структуры, высоких прочностных и пластических характеристик металла колец необходима как качественная, так и количественная оценка кинетики течения металла в очаге деформации.

Для выявления и определения локальных напряжений, механизма формирования структуры металла необходимы специальные методы, которые позволили бы создать модель очага деформации, отражающую физические и механические явления процесса.

В связи с научной и практической важностью вопроса изучения механизма течения металла при раскатке рассмотрим основные работы, выполненные в этой области.

Так как раскатка является комплексным процессом наложения осадки на прокатку [47], то рассмотрим эти составляющие в отдельности. Это необходимо сделать для получения полной картины совмещенной деформации при раскатке и определения влияния каждого из составляющих процесса на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации.

Первыми работами, констатирующими факт наличия неоднородности в очаге деформации при прокатке, являются работы Е.Бласса (1882 г.), А.Холленберга (1883 г.) [95].

В дальнейшем И.М.Павловым в 1927 г. была разработана теория течения металла при прокатке, т. н. "теория жестких концов" [96]. Им предложена классификация причин, вызывающих неравномерность деформации [65].

Н.А.Соболевским и А.Ф.Головиным выполнены работы по исследованию приконтактных зон очага деформации: скольжения и прилипания, получения формулы расчета их протяженности [66, 97].

Большой вклад в исследование неоднородности очага деформации при прокатке внесли А.И.Колпашников, А.П.Чекмарев, А.И.Целиков, И.Я.Тарновский, В.С.Смирнов, Т.М.Голубев, Н.Мец, В.Тринкс и др.[79, 90, 98...105]. Ими на основе метода решения уравнений равновесия и пластичности, вариационных и

энергетических методов, метода линий скольжения получены решения по определению энергосиловых и кинематических параметров прокатки. Однако авторы этих работ в основном касаются механики процесса прокатки и недостаточно полно объясняют кинетику протекания физических явлений.

Для создания модели очага деформации, обеспечивающей оптимальное напряженно-деформированное состояние при раскатке, необходим комплекс специальных методик.

2.1. Экспериментальное исследование очага деформации при раскатке кольцевых профилей авиационных двигателей и разработка физической модели строения очага деформации

2.1.1. Определение напряженно-деформированного состояния очага деформации процесса раскатки колец методом равнопрочных вставок

В настоящее время для изучения кинетики течения металла при прокатке имеется множество методов, обзор которых приведен в работах [94, 101...103, 106].

Впервые в 1883 году А.Холлинбергом было изучено течение металла при горячей прокатке полос из сварного железа посредством запрессовки стержней в вертикально засверленные отверстия [95]. Н.Мец усовершенствовал методику А.Холлинберга, заменив гладкие стержни винтами, что позволило судить не только о продольной, но и о высотной деформации [101]. Метод координатной сетки, наносимой на боковых гранях и внутри полосы, использовался в исследованиях В.Тринкса [102] и И.Я.Тарновского [103]. О.Г.Музалевским впервые был применен метод скоростной киносъемки, фиксирующий изменение параметров координатной сетки, нанесенной на боковой поверхности образцов [106].

Анализ вышепоименованных методов позволил для исследования кинетики течения металла и создания физической модели очага деформации при прокатке, осадке и раскатке разработать метод равнопрочных вставок. Он дает возможность исследовать локальные изменения деформации в объеме очага и достаточно точно рассчитать напряжения в нем.

Для исследования очага деформации были изготовлены кольцевые прямолинейные образцы из алюминиевого сплава АМг6, в которых послойно сверлились отверстия и заполнялись вставками из того же металла. Образцы нагревались до температуры горячей деформации в электропечах сопротивления и затем подвергались формоизменению. Прокатка экспериментальных образцов из сплава АМг6 размерами 240x200x1350 производилась на стане кварто с диаметром рабочих валков 900 мм и скоростью прокатки 0,5 м/с, принятой в листопрокатном производстве для данного сплава. Осадка и раскатка кольцевых образцов размерами 0400x0340x30 осуществлялись на кольцераскатном стане модели РМ1200 с диаметром рабочих валков: верхнего приводного 550 мм и нижнего холостого 200 мм; Максимальная скорость подачи нажимного устройства составляла 16 мм/с; скорость прокатки, предусмотренная конструкцией стана, соответствовала 1,5 м/с. В целях изучения кинетики течения металла в очаге деформации осуществляли торможение валков при прокатке, осадке и раскатке, получая очертания очага

деформации (рис.2.1, 2.2). Недокатанные и осаженные образцы разрезались, шлифовались, травились. Исследование характера течения металла в образцах производилось раздельно по зонам: в приконтактной, промежуточной и центральной.

Интенсивность деформаций в зонах определялась аналитически, по общеизвестной зависимости

$$e_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 \cdot e_2} \quad (2.1)$$

где e_1, e_2 - истинные деформации.

Компоненты деформации определялись по формулам

$$e_1 = \ln \frac{a_1}{a_0}, \quad e_2 = \ln \frac{b_1}{b_0}, \quad (2.2)$$

где a_0, b_0, a_1, b_1 - геометрические параметры вставок до и после деформации.

Замеры геометрических параметров вставок производились на микроскопе модели МПБ-2 с точностью $\pm 0,05$ мм.

Для определения интенсивности напряжений в очаге деформации воспользуемся зависимостью А.В.Третьякова и В.И. Зюзина:

$$\sigma_i = \sigma_s k_{ei} k_e k_t, \quad (2.3)$$

где σ_s - базисное значение сопротивления деформации;

k_{ei} - коэффициент интенсивности деформации (рис. 2.3);

k_e - коэффициент скорости деформации (рис. 2.4);

k_t - температурный коэффициент (рис. 2.5).

Используемый метод расчета напряжений удобен и прост для расчетов, так как позволяет достаточно точно определить их значения при любой температуре, скорости и степени деформации в исследуемом интервале параметров.

Для исследования напряженно-деформированного состояния в очаге деформации использовался также метод, позволяющий по параметрам зерна определить характер течения металла и формирования зерен в зависимости от сжимающих и растягивающих напряжений. Металлографический анализ проводился на микроскопе НЕОФОТ-30. Поверхность исследуемых образцов подвергалась механическому полированию, а затем травлению в травителях стандартного состава. При приготовлении шлифов обеспечивалось снятие поверхностного слоя, наклепанного при изготовлении.

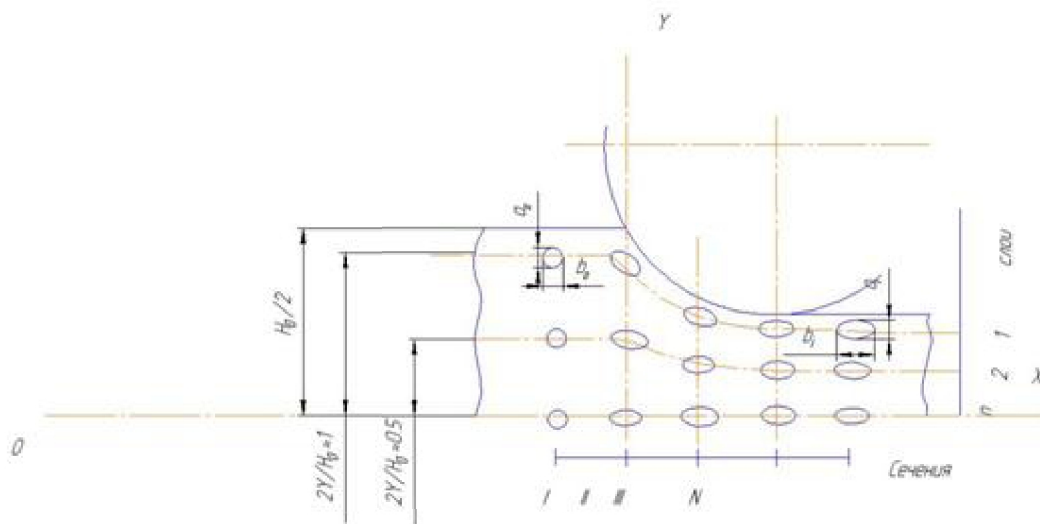


Рис. 2.1. Схема изменения геометрических параметров вставок в очаге деформации при процессах прокатки и раскатки

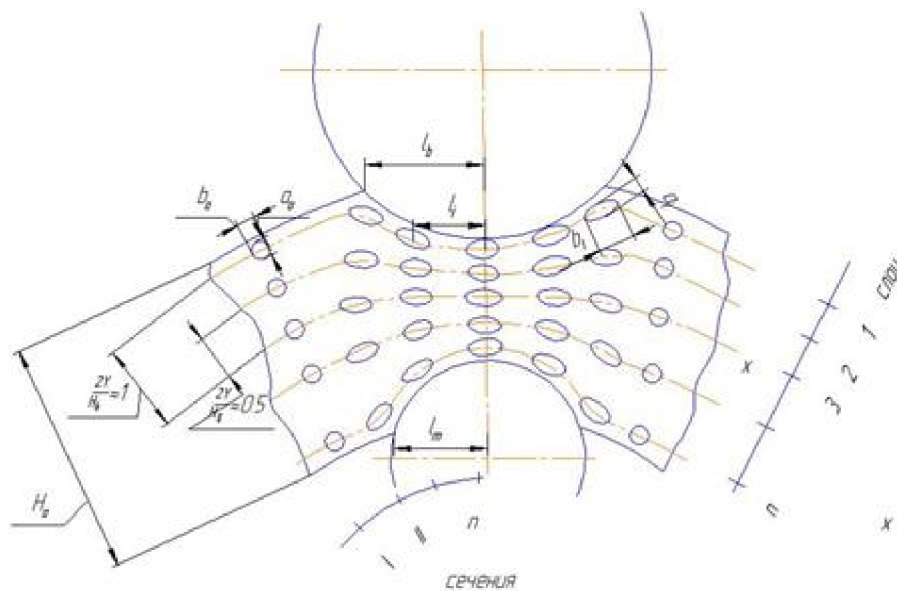


Рис. 2.2 Схема изменения геометрических параметров вставок в очаге деформации при осадке

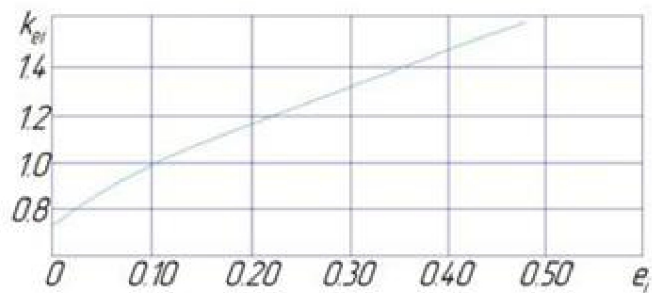


Рис. 2.3. Степенной коэффициент k_{ei} алюминиевого сплава АМг6 [116]

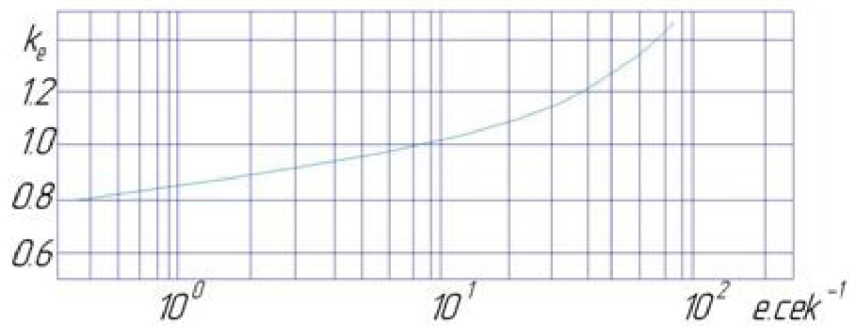


Рис. 2.4. Скоростной коэффициент K_e алюминиевого сплава АМг6 [116]

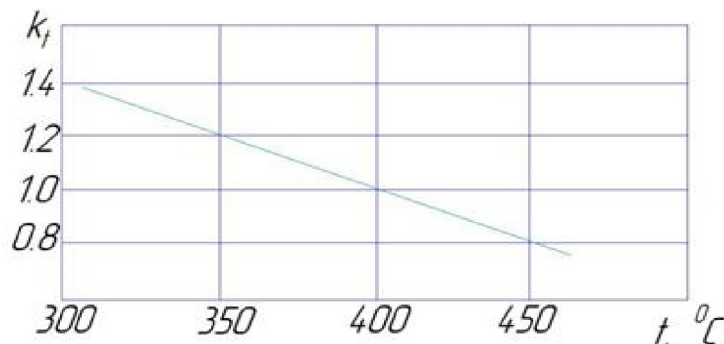


Рис. 2.5. Температурный K_t алюминиевого сплава АМг6 [116]

При исследовании неоднородности деформации по структурным изменениям в очаге кроме металлографического анализа применялся метод исследования субструктуры. Субструктура изучалась на электронном микроскопе модели ЭВМ-100ЛМ методом прямого исследования. Использование метода прямого исследования позволило наблюдать состояние твердого раствора и фазового состава сплава ХН68МВТЮК-ВД, а также изменение плотности дислокаций.

Для определения плотности дислокаций использовался метод секущих, который позволяет замерять плотность дислокаций:

$$\rho \geq 10^9 \text{ м}^{-2}.$$

Он состоит в следующем. На электронно-микроскопическом снимке наносят сетку произвольно ориентированных линий суммарной длиной T . Подсчитывают число их пересечений с дислокациями q . Плотность дислокаций находится с использованием зависимости

$$\rho = \frac{q\mu^2}{tT}, \quad (2.4)$$

где t - толщина фольги; μ - увеличение.

Размер частиц упрочняющей γ' - фазы в различных точках очага деформации исследовался на рентгеновской установке УРС-60, в камере РКУ и РКД на излучении CuK_2 с алюминиевым фильтром для отсеивания вторичного излучения. γ' - фаза изолировалась от основного твердого раствора методом анодного растворения.

В результате экспериментов по исследованию напряженно-деформированного состояния при прокатке, осадке и раскатке с применением вышеприведенной методики установлен характер деформации, построены зависимости интенсивности деформаций и напряжений в очаге деформации при прокатке (рис. 2.6, 2.9), осадке (рис. 2.10, 2.13) и раскатке (рис. 2.14, 2.17). Используя распределение интенсивности деформаций и напряжений по длине очага деформации при раскатке (см. рис. 2.6, 2.8), можно видеть, что интенсивности деформации и напряжений возрастают от входа в валки до выхода металла из валков. Причем по всей длине очага деформации напряжения уменьшаются от поверхности к центральным слоям образца, что приводит к существенной высотной неоднородности (рис. 2.7, 2.9).

При осадке (рис. 2.10, 2.12) в приконтактных слоях наблюдается резкое снижение интенсивности деформации и напряжений вблизи вертикали, соединяющей центры валков (сечение 7), что объясняется наличием зон затрудненной деформации из-за значительных сил трения в месте контакта металла с инструментом. В центральных слоях интенсивности деформации и напряжений возрастают от входа металла в валки к средним сечениям 5-6, несколько снижаясь к сечению 7. В сечении 7 наблюдается значительное превышение интенсивности деформации и напряжений в центральных слоях по сравнению с периферийными (рис. 2.11, 2.13). По мере удаления от сечения 7 к 1 картина меняется на обратную - интенсивность деформации и напряжения в центральных слоях существенно меньше, чем в приконтактных.

При раскатке интенсивности деформации и напряжения, также как и при прокатке, возрастают от входа металла в валки к выходу (рис. 2.14, 2.16). Но в отличие от прокатки здесь величины интенсивности деформации и напряжений выше. Это говорит об увеличении активной зоны очага деформации за счет влияния процесса непрерывной осадки. Высотное распределение интенсивности деформации напряжений (рис. 2.15, 2.17) имеет более однородную картину по сравнению с процессом прокатки.

Как видно из рис. 2.6...2.13, деформированное и напряженное состояние при прокатке и осадке имеет неоднородную картину, четко просматриваются зоны со значительными локальными напряжениями и зоны отставания. В рассматриваемом случае прокатки образца с высоким очагом деформации (рис. 2.6...2.9) при $l/h_{cp}=0,5...1,0$ наблюдается резкая неоднородность. В случае осадки (рис. 2.10...2.13) при $l/h_{cp}=1,0$ наблюдается типичная картина очага с наличием зон интенсивной и затрудненной деформации, характерных для случая осадки с трением по контактными поверхностям.

При совмещенном процессе деформации (рис. 2.14...2.17) при $l/h_{cp}=1,0$ деформированное и напряженное состояние по высоте очага довольно однородно.

При анализе вышеописанных результатов можно установить, что строение очагов деформации зависит от схемы объемного напряженно-деформированного состояния. Например, при прокатке явно выражены три зоны очага деформации: в приконтактных слоях - зона интенсивной деформации, далее по глубине очага располагается переходная зона деформации, затем - зона упругой пластической деформации.

При осадке наблюдается четыре зоны деформации. В месте начала вдавливания валков в заготовку, по оси, соединяющей центры валков, четко просматриваются зоны затрудненной деформации, затем располагаются зоны интенсивной деформации. В начале процесса осадки имеют место зоны избирательной и упругопластической деформации.

При совмещенной деформации очаг имеет картину, напоминающую модель очага, наблюдаемого при прокатке, но зоны интенсивной деформации распространяются на более значительную глубину.

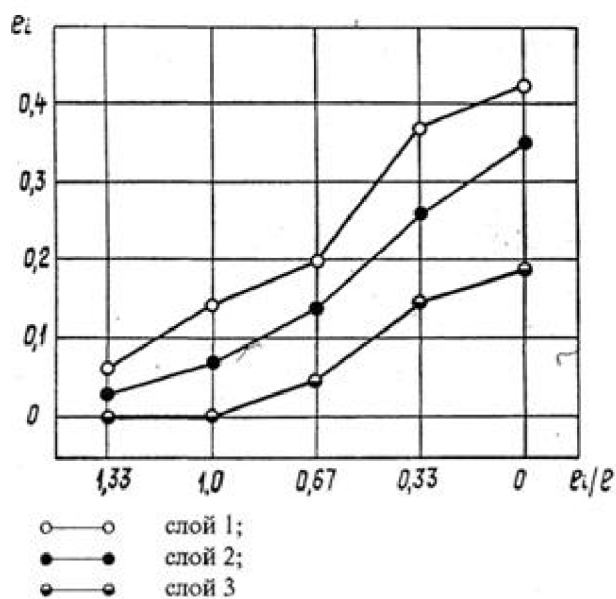


Рис. 2.6. Распределение интенсивности деформации по длине очага деформации при прокатке прямоугольного образца из сплава АМгб

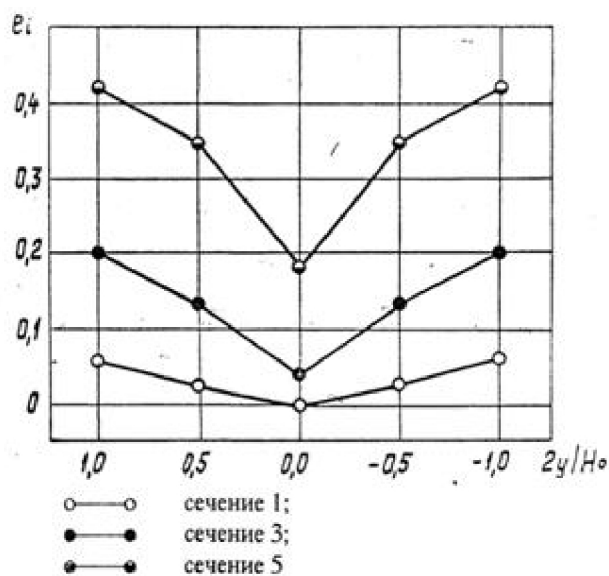
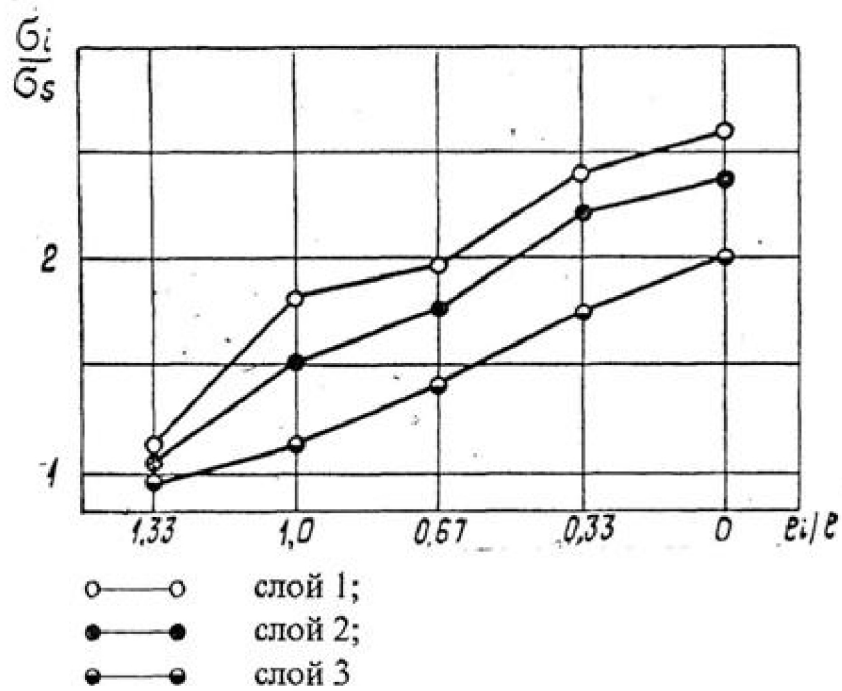


Рис. 2.7. Распределение интенсивности деформации по высоте очага деформации при прокатке прямоугольного образца из сплава АМгб



с

Рис. 2.8. Распределение напряжений по длине очага деформаций при прокатке прямоугольного образца из сплава АМгб

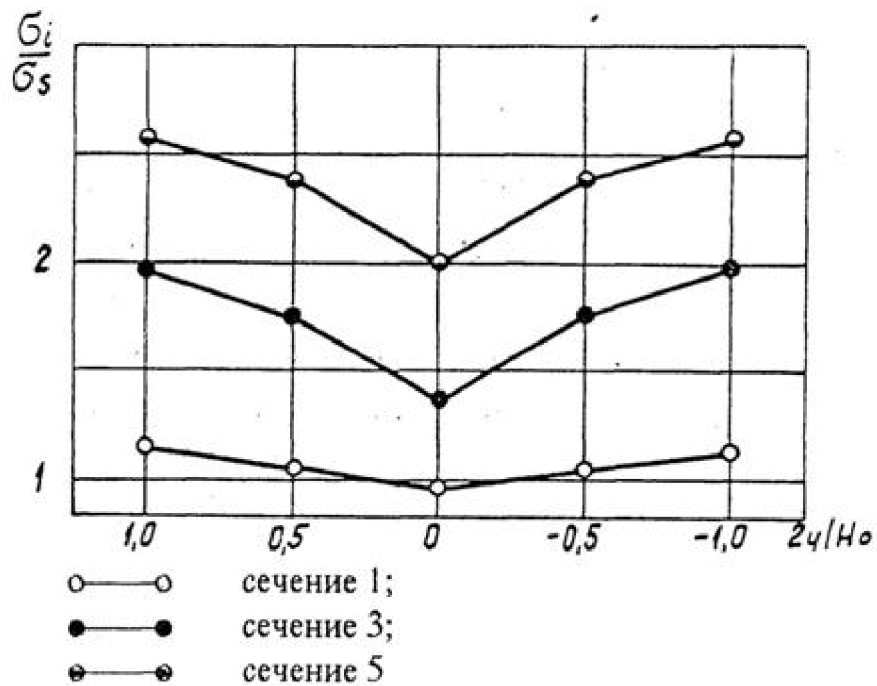


Рис. 2.9. Распределение напряжений по высоте очага деформации при прокатке прямоугольного образца из сплава АМгб

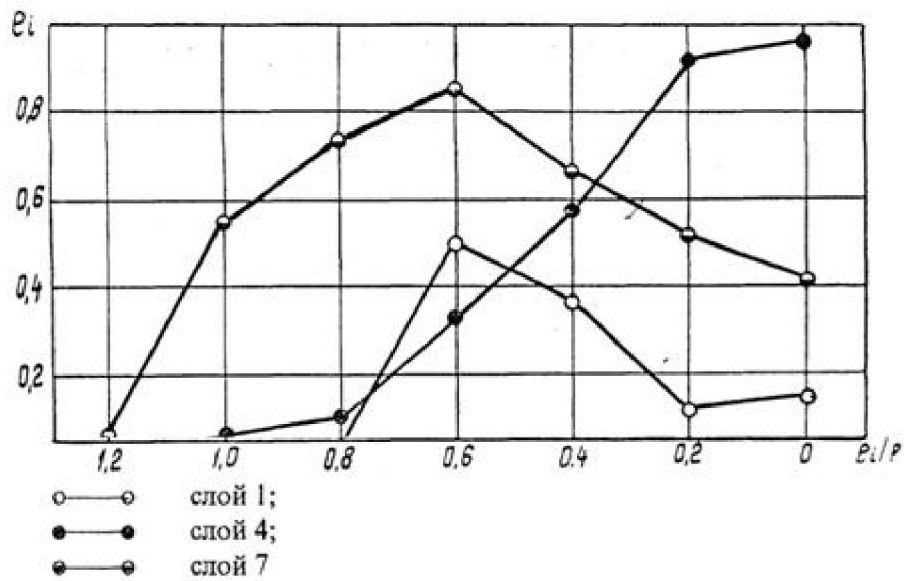


Рис. 2.10. Распределение интенсивности деформации по длине очага деформации при осадке кольцевого образца из сплава АМгб

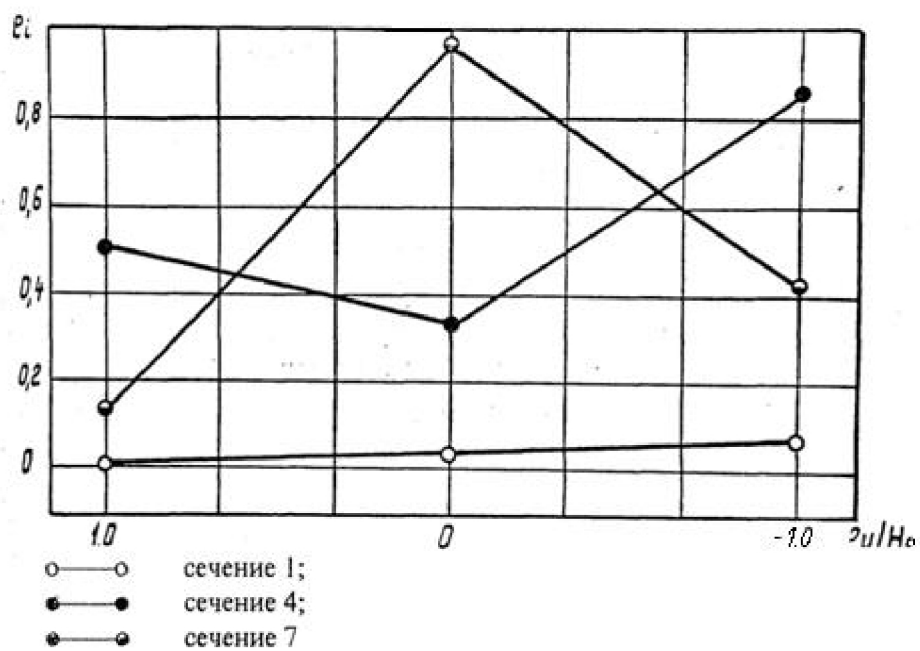


Рис. 2.11. Распределение интенсивности деформации по высоте очага деформации при осадке кольцевого образца из сплава АМгб

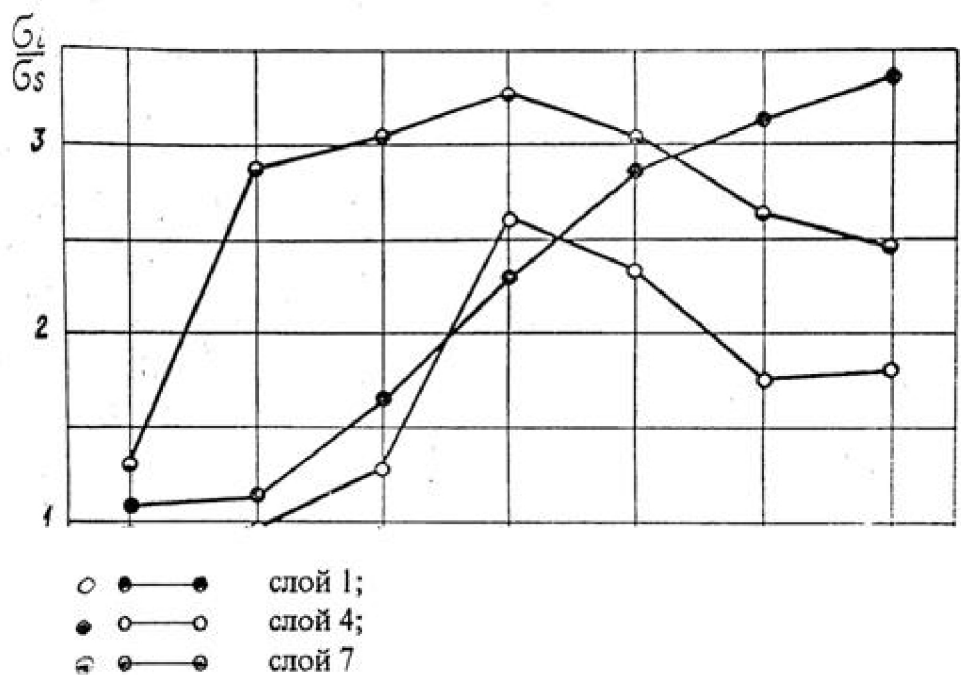


Рис. 2.12. Распределение напряжений по длине очага деформации при осадке кольцевого образца из сплава АМгб

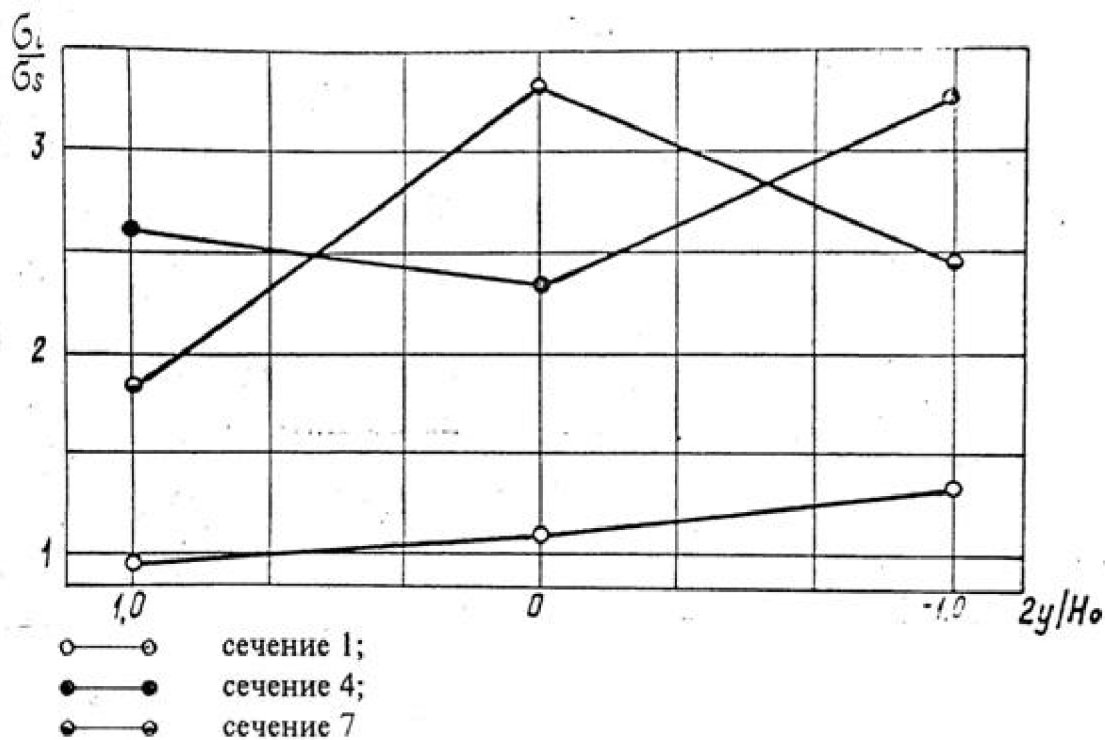


Рис. 2.13. Распределение напряжений по высоте очага деформации при осадке кольцевого образца из сплава АМгб

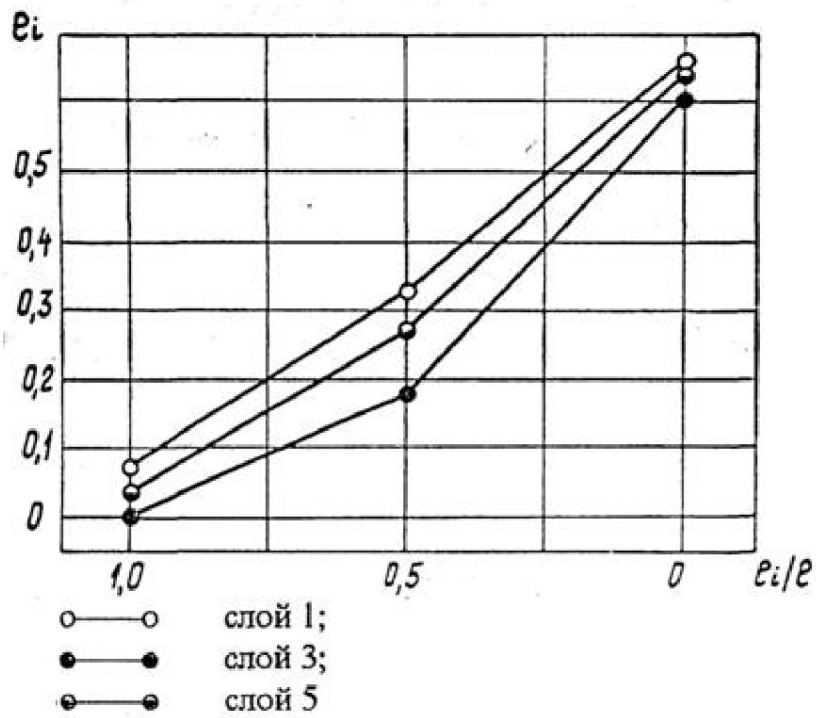


Рис. 2.14 Распределение интенсивности деформации по длине очага деформации при раскатке кольцевого образца из сплава АМгб

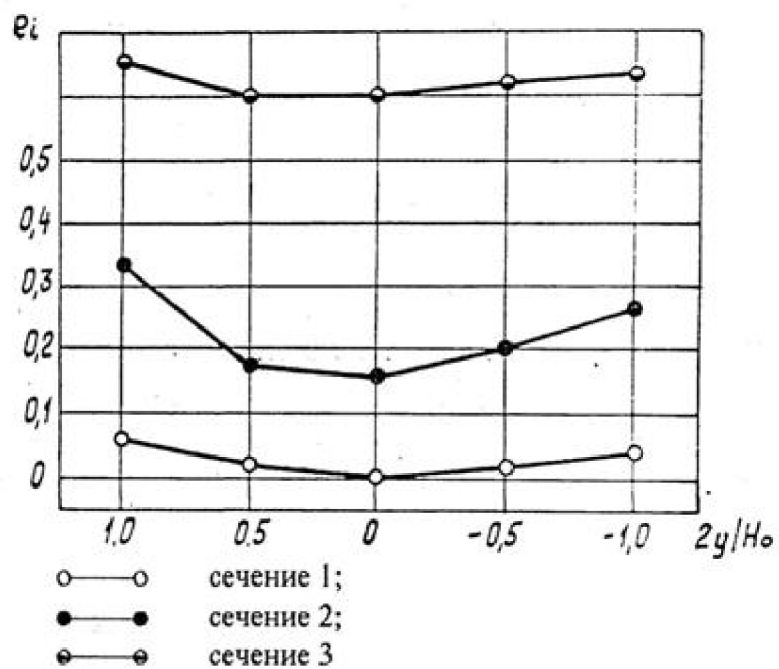


Рис. 2.15. Распределение интенсивности деформации по высоте очага деформации при раскатке кольцевого образца из сплава АМгб

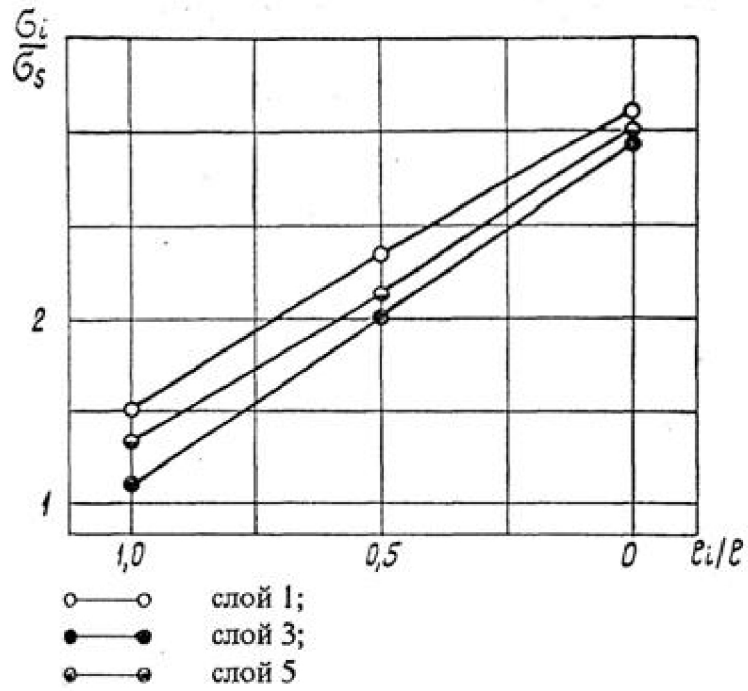


Рис. 2.16. Распределение напряжений по длине очага деформации при раскатке кольцевого образца из сплава АМгб

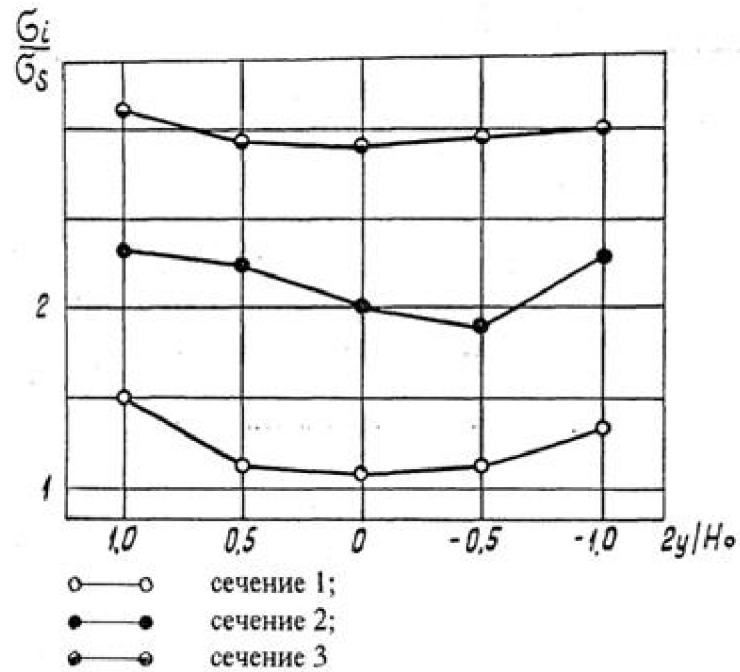


Рис. 2.17. Распределение напряжений по высоте очага деформации при раскатке кольцевого образца из сплава АМгб

2.1.2. Изучение очага деформации процесса раскатки колец металлографическим методом

С целью получения более полной картины деформации в очаге характер течения металла изучался по изменению макроструктуры и микроструктуры.

При прокатке помимо зон, описанных при анализе напряженно-деформированного состояния, просматривается еще одна зона 1, толщиной 1...2 мм, прилегающая к валкам, имеющая мелкое наклепанное зерно. Образование этой зоны объясняется захлаживанием металла в зоне контакта с валками. В результате понижения температуры в зоне 1 напряжение, необходимое для прохождения пластической деформации, резко увеличивается и зона интенсивной пластической деформации перемещается на более значительную глубину. Зоны интенсивной пластической деформации (зоны 2) обладают однородной мелкозернистой структурой. Далее по глубине располагаются зоны 3 с неоднородной структурой, имеющие зерна аналогичные зонам 2, и зерна с исходной крупнозернистой структурой - это зоны избирательной деформации. Затем наблюдается зона малопластической деформации с крупным нефрагментированным зерном.

Следует также отметить существенную неоднородность структуры и по длине очага. Очаг деформации в зависимости от изменения структуры можно разделить по длине на три зоны. Каждая структурная зона определяется величиной деформации. В первой зоне, где зерно еще не отличается от исходного, протекает докритическая деформация. Далее во второй зоне, где зерно крупное, имеет место критическая деформация. Третья зона, расположенная в зоне максимальных напряжений, характеризуется мелким зерном - это результат действия закритической деформации. Согласно данным физического изменения структуры на входе полосы в валки низкий очаг деформации может иметь форму параболы, направленной глубоко в центр очага по направлению прокатки (рис. 2.18). Такая же форма наблюдается при разовой степени деформации $\delta > 40\%$ или суммарной $\delta > 50\%$. При небольших разовых обжатиях силовое поле очага имеет форму двух сопряженных гипербол. В центре находится зона упругопластической деформации, которая сохраняется по всей длине полосы после выхода из валков.

Структура темплета, полученного при осадке, показывает наличие зон затрудненной деформации в поверхностных слоях, сходящих к нулю вблизи выхода металла из валков, т.е. зоны затрудненной деформации типичны для осадки с трением на контактных поверхностях инструмента. Данная зона 1 имеет крупное зерно. Затем наблюдается зона 2 интенсивной деформации с мелким однородным зерном, далее идут зоны избирательной пластической и упругопластической деформации.

При рассмотрении структуры темплета, полученного совмещенной деформацией, можно наблюдать зоны, аналогичные процессу прокатки, но следует отметить, что зоны с однородным мелким зерном распространяются на значительно большую глубину.

Основываясь на вышеприведенных исследованиях и рассуждениях, можно схематически представить модели физического очага деформации для всех трех рассматриваемых процессов. На рис. 2.19 приведена модель физического строения высокого очага деформации при прокатке.

Зоны 1 - это зоны холодной деформации, имеющие мелкое наклепанное зерно, напряженное и деформированное состояние - двухосное сжатие с тангенциальной составляющей растяжения.

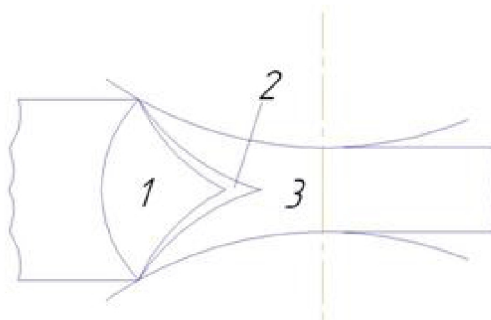


Рис. 2.18. Модель низкого очага деформации при прокатке с суммарной деформацией $\varepsilon \geq 50\%$:
 1 – зона докритической деформации;
 2 – зона критической деформации;
 3 – зона закритической деформации

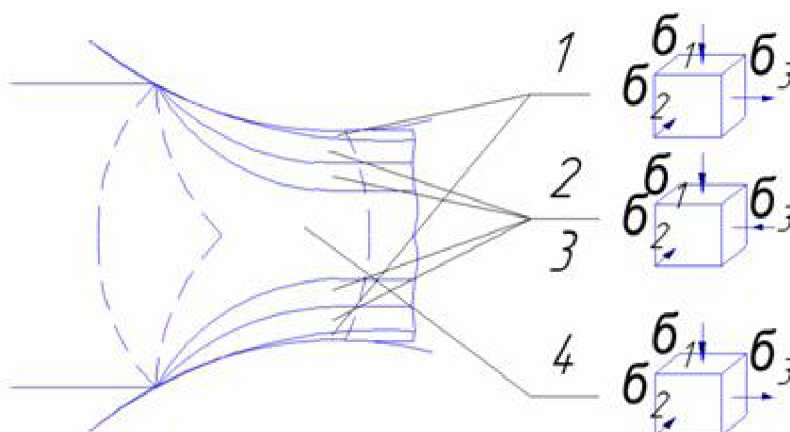


Рис. 2.19. Модель напряженно-деформированного состояния очага деформации при прокатке. Высокий очаг

Зоны 2 - зоны активной деформации с интенсивной фрагментацией зерна, напряженное состояние - всестороннее сжатие, деформированное состояние - двухосное, в плоскости прокатки, растяжение с вертикальной составляющей сжатия

Зоны 3 - зоны избирательной деформации, структура разнотернистая, напряженно-деформированное состояние качественно приближается к картине зон 2.

Зона 4 - зона упругой и малопластической деформации без существенного изменения формы зерна. Картина напряженно-деформированного состояния аналогична зонам 1.

При высоком очаге процесс деформации в верхних слоях осуществляется сдвигом в основном по телу зерна и частично по границам за счет перемещения

большого количества дислокаций. Металл при этом упрочняется.

Во вторых слоях в основном протекает горячая деформация. В этом случае пластическая деформация протекает сдвиговым и диффузионным механизмом. Возможна деформация двойникованием. При горячей пластической деформации искажения этих слоев, создаваемые в кристаллической решетке движениями дислокаций, частично снимаются. Это объясняется наличием процессов возврата, рекристаллизации обработки и собирательной рекристаллизации. При этом процесс деформации протекает локально, часть дислокаций аннигилирует.

Третьи слои металла подвергаются избирательной деформации, отдельные зерна, атомные плоскости которых благоприятно расположены к деформирующей силе, подвергаются сдвиговой деформации [107]. При разгрузке такой системы часть кристаллитов, в которых напряжения были максимальны, остаются не полностью разгруженными, несмотря на удаление внешней нагрузки.

Вследствие затухания силовых воздействий от валков в средней части зеренная структура подвергается упругопластической деформации, зерна до определенной степени не меняются, но вследствие деформации верхних слоев может вытягиваться средняя часть. Для этого необходимо, чтобы объем деформированных верхних слоев был или равен, или больше объема центрального слоя. Тогда деформирующие силы в верхних слоях достигнут такой величины, при которой будут деформироваться в продольном направлении и средние слои. При этой схеме деформация в средних слоях проходит межкристаллическая и частично сдвиговая, или транскристаллическая.

На рис. 2.20 приведена модель очага деформации при осадке. По характеру напряженно-деформированного состояния зоны 1, 2, 3 идентичны зонам процесса прокатки, соответственно 1, 2, 4.

На рис. 2.21 показана модель физического строения очага деформации при раскатке. Здесь мы имеем картину, аналогичную процессу прокатки, но с меньшей неоднородностью деформации. Это объясняется наложением на напряженное состояние прокатки процесса осадки. Резко повышается сдвиговая деформация за счет увеличения касательных напряжений.

Основываясь на вышеприведенных рассуждениях, можно утверждать, что при совмещенном процессе деформации (раскатка) как высотная, так и продольная неоднородность очага значительно уменьшается.

При раскатке колец с низким очагом деформации зерно интенсивно измельчается, металл уплотняется, параметры границ уменьшаются, межатомные связи растут. Это приводит к повышению свойств металла.

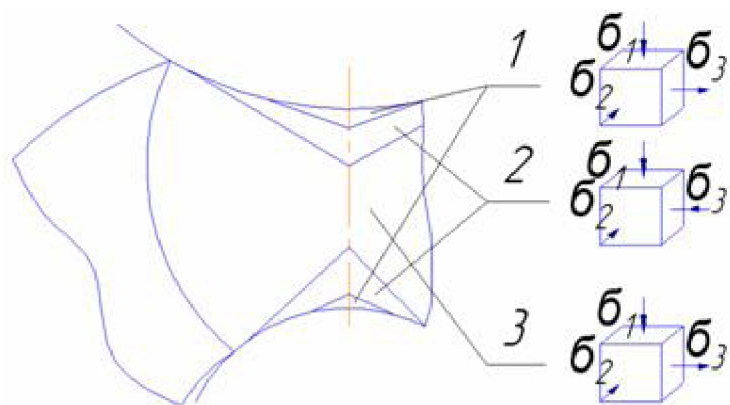


Рис. 2.20. Модель напряженно-деформированного состояния очага деформации при осадке. Высокий очаг

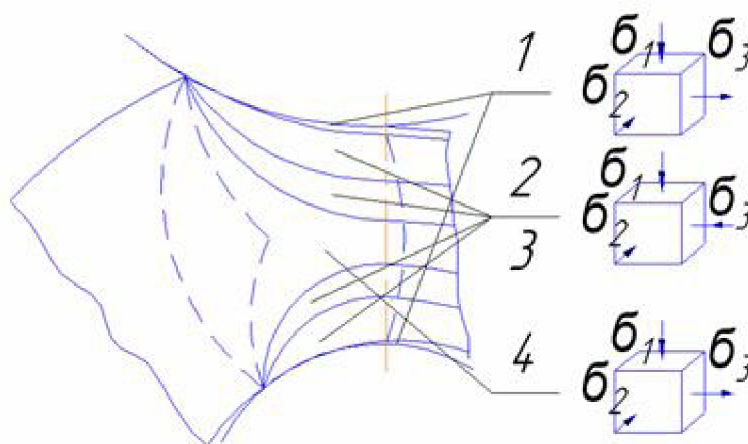


Рис. 2.21. Модель напряженно-деформированного очага деформации при раскатке. Высокий очаг

2.1.3. Исследование субструктурного состояния очага деформации процесса раскатки колец

Состояние субструктуры - распределение интерметаллидных, карбидных и других частиц, их величина и плотность дислокации решающим образом влияют на эксплуатационные характеристики колец ГТД.

Проведем сравнительный анализ субструктурного состояния металла колец раскатанных старым методом с высоким очагом деформации и новым методом с низким очагом деформации.

Структура исследовалась на кольцевых образцах и сплавах ХН68МВТЮК-ВД по длине и высоте очага деформации в девяти зонах (рис. 2.22).

Проведенные рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования колец с высоким очагом, подвергнутых деформации 60% при температуре в конце раската 900°C, позволили получить сведения о структуре сплава. Одним из результатов данных исследований является обнаружение распада твердого раствора в процессе горячей деформации и образование метастабильной

γ' - фазы, когерентно связанной с матрицей. Об этом свидетельствует деформационный контраст, наблюдавшийся на электронно-микроскопических снимках. В сечениях, соответствующих зонам 1, 2, 5, 6, деформация была равной 5... 10%, частицы γ' - фазы круглой формы и неравномерно расположены в матрице.

Изолированная от основного твердого раствора γ' - фаза была исследована рентгенографически. Оказалось, что после деформации 5... 10% ее размер составляет $D=260 \text{ \AA}$. После увеличения обжатия до 21 и 58% частицы γ' - фазы становятся мельче ($D=170 \text{ \AA}$).

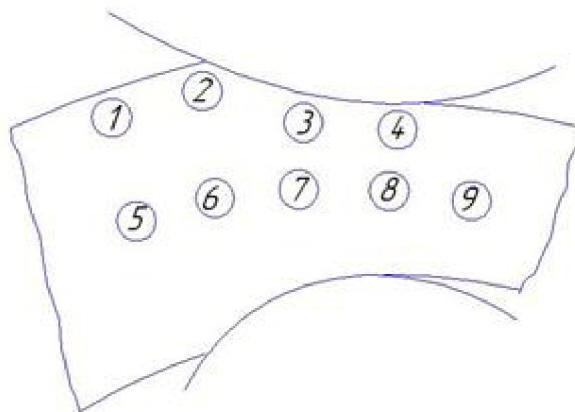


Рис. 2.22. Схема зон исследования очага деформации при раскатке

Количество выделившейся фазы при высоких степенях деформации несколько больше, что качественно наблюдалось при проведении электролитического растворения образцов. Это можно объяснить повышением плотности несовершенств кристаллической решетки сплава, способствующих увеличению центров выделяющейся фазы. Данные предположения подтверждаются электронно-микроскопически: невысокая при данной обработке плотность дислокаций с повышением обжатия увеличивается.

Исследование величины γ' - фазы в зонах 5, 6, 7, 8, 9 показывают, что γ' - фаза не уменьшается, она имеет величину $D=250...260 \text{ \AA}$. Это показывает, что даже при суммарной деформации равной 50...60% в кольце с высоким очагом γ' - фаза почти не изменилась и, естественно, это не могло не сказаться на равномерности распределения γ' - фазы и однородности механических свойств сплава.

Исследование низкого очага деформации при таком же обжатии 50...60% показывает, что γ' - фаза равномерно распределяется в структуре матрицы.

На недокате с обжатиями 50...60% в зонах 1, 2, 5, 6 размеры частиц γ' - фазы не меняются ($D=250...260 \text{ \AA}$), а в точках 3, 4, 7, 8 она имеет меньшую величину порядка $180...200 \text{ \AA}$, в зоне 9 - $100... 120 \text{ \AA}$. Все это указывает на то, что процесс деформации при низком очаге протекает интенсивнее, карбиды Cr_2ZrC_6 становятся мельче (1...2 мкм), в то время как в высоком очаге они более крупные (5...7 мкм).

Макрозерно, блоки во втором случае становятся мельче.

Как видно из рис. 2.23, существует две возможности повышения прочности металла: 1) создание бездефектной структуры; 2) повышение плотности дефектов. Создать бездефектный металл на сегодняшний день практически невозможно. Реально возможен только второй путь.

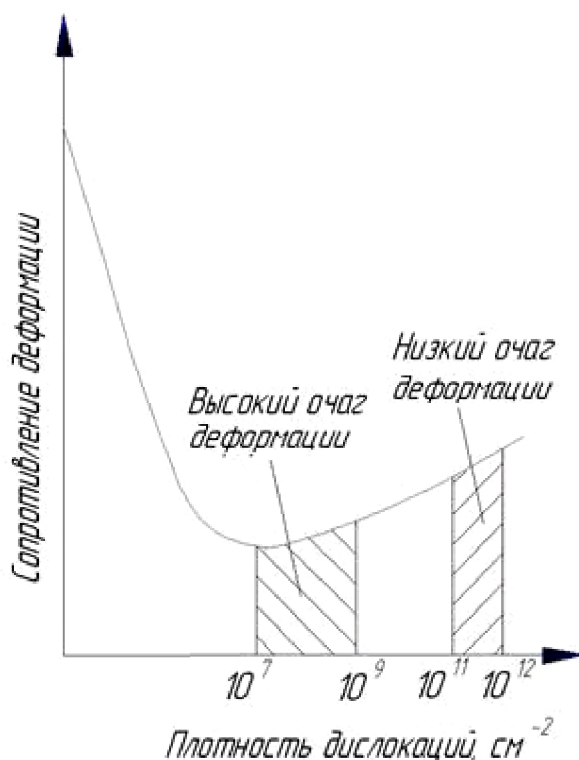


Рис. 2.23. Схема зависимости сопротивления деформации от плотности дислокаций при раскатке колец из сплава ХН68ВМТЮК-ВД

Известно, что в результате действия деформационного механизма за счет интенсивного перемещения дислокаций макро- и микрочерно измельчается, а упрочняющие фазы становятся мелкодисперсными. Вследствие этого плотность дислокаций значительно повышается, блочная структура становится мелкой, толщина границ зерен уменьшается, возрастают атомные связи. Это приводит к одновременному повышению, прочностных и пластических характеристик металла. Оптимальной плотностью дислокаций для сплавов с гетерогенной структурой является $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [107].

Исследование плотности дислокаций при раскатке колец из сплава ХН68ВМТЮК-ВД при высоком и низком очаге деформации показало оптимальное состояние дислокационной структуры низкого очага (см. рис. 2.23).

Учитывая вышесказанное, а также результаты исследования, изложенные в данном разделе, можно утверждать, что сопротивление деформации при низком очаге деформации возрастает.

2.2. Теоретический анализ напряженного состояния в очаге деформации при раскатке колец авиационных двигателей с учетом теории ортотропных сред

Современные аналитические исследования напряженного состояния, как правило, осуществляются с использованием законов пластической механики изотропных твердых тел без учета структурной неоднородности, дефектности металла и реальных условий обработки давлением. Так, например, теория напряженного состояния, разработанная А.И.Целиковым, рассматривает условия формоизменения только изотропного тела. Эта теория, как отмечают А.И.Целиков и А.Д.Томленов [79,108], не обеспечивает решения задач по прокатке тел с высоким очагом деформации, т.е. не учитывает высотную неоднородность напряженно-деформированного состояния в очаге деформации.

В работах В.С.Смирнова, А.П.Чекмарева [101, 90] предложены методы расчета напряженного состояния в очаге деформации при прокатке и осадке как низких, так и высоких полос с учетом неоднородности протекания деформации, которые, по мнению авторов данной работы, достаточно полно отображают реальную картину процессов прокатки и осадки.

Расчет и проектирование технологических процессов, в предположении шаровой изотропии деформируемого тела, дает достаточно полное представление о механике формоизменения, но недостаточно полно отражает физику пластического течения при реально существующей анизотропии кольцевых профилей, что снижает точность расчетов.

Теория пластичности анизотропных сред позволит повысить точность расчетов напряженного состояния очага деформации при раскатке колец и создать условия для управления процессом формоизменения, их механических свойств и анизотропии.

2.2.1. Напряженное состояние в очаге деформации при раскатке колец авиационных двигателей

Используя предложенный В.С.Смирновым математический аппарат, с учетом теоретических положений, учитывающих анизотропию деформации, разработанных Ю.М. Арышенским, выведем зависимость для определения картины напряженного состояния при совмещенном процессе прокатки с наложением осадки, т.е. для процесса раскатки (рис. 2.24).

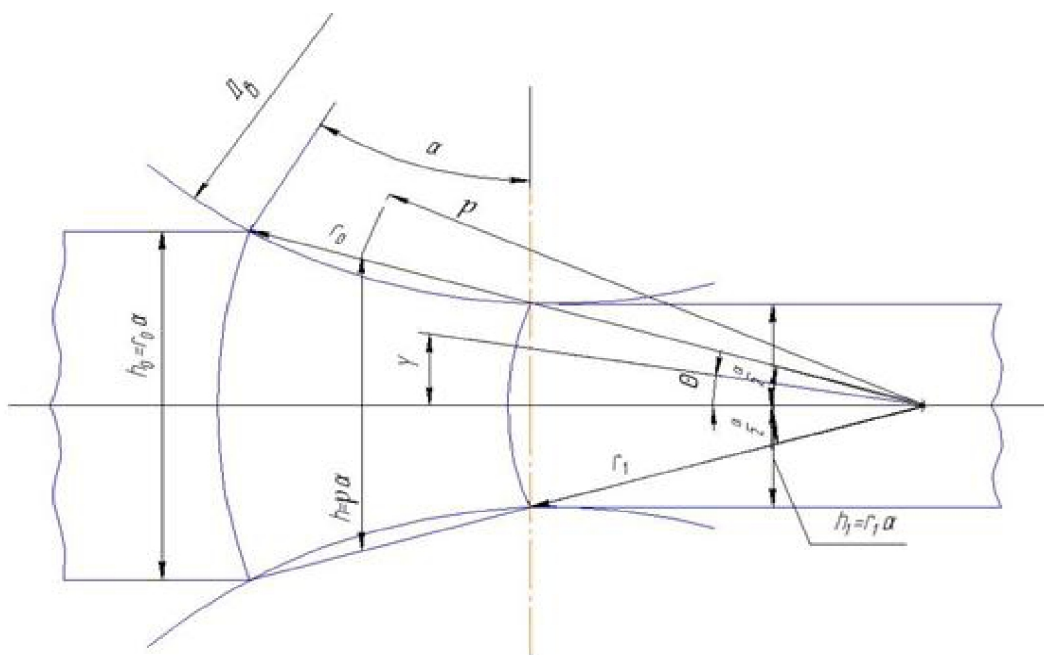


Рис. 2.24. Схема к расчету напряжений при прокатке, осадке и раскатке

Рассмотрим плоскую задачу теории пластичности в цилиндрических координатах. Примем допущение малого отличия направлений главных осей от направления произвольно выбранных осей координат.

Запишем уравнения статического равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} &= 0, \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{\rho\theta}}{\rho} &= 0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Уравнение пластичности для ортотропного тела запишем в виде

$$\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_\rho}{2K} \right)^2 + \tau_{\rho\theta}^2 = \tau_s^2, \quad (2.6)$$

где $\sigma_\theta, \sigma_\rho, \tau_{\rho\theta}$ - поперечное, продольное и касательное напряжения;

R - текущий радиус; θ - текущий угол; K - коэффициент, учитывающий анизотропию,

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \mu}{(1 - \mu_2)(1 - \mu_{12}\mu_{21})}};$$

μ_2 - показатель анизотропии под углом 45° к оси 2; $\mu_{12}\mu_{21}$ - показатели анизотропии при сжатии по оси 1 и 2 и растяжении по оси 2 и 1 соответственно; τ_s - предел текучести материала на сдвиг в главных плоскостях симметрии материала,

$$\tau_s = \sigma_{s1} \sqrt{\frac{1 - \mu_2}{1 + \mu_2}};$$

σ_{s1} - напряжение текучести при деформации в направлении 1.

При наличии деформационного упрочнения необходимо совместно интегрировать два дифференциальных уравнения равновесия с учетом уравнения, выражающего закон связи между обобщенным напряжением и деформацией. Если для случая прокатки принять условие пластичности в виде

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = 2K\tau_s \left(\frac{r}{\rho}\right)^n,$$

где n - коэффициент, характеризующий упрочнение, то исходная система уравнений будет иметь вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = 2K\tau_s \left(\frac{r}{\rho}\right)^n.$$

Так как силовое поле процесса осадки накладывается на силовое поле прокатки при совмещенном процессе деформации, то на основании уравнений (2.9), (2.10), (2.11) для раскатки кольцевых профилей будем иметь для зоны отставания:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_\theta}{\sigma_s} = -\frac{\sqrt{3}}{2}n_3 \left\{ \frac{1}{\delta - n} \left[(\delta - 1) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^\delta + 2K\tau_s (1 - n) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n \right] + 2K\tau_s \left(\frac{1}{n} - 1\right) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n \right\} \varphi_2 + \\ + \sqrt{3}n_3 K\tau_s \left(\frac{1}{n} - 1\right) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n - \frac{n_3}{2\mu} \left[1 + \frac{2\mu}{r_0 \sin \alpha} (r_0 \cos \alpha - \rho \cos \theta) \right] \varphi_3; \\ \frac{\sigma_\rho}{\sigma_s} = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_s} + \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n 2K\tau_s. \end{cases} \quad (2.8)$$

Для зоны опережения

$$\begin{cases} \frac{\sigma_\theta}{\sigma_s} = -\frac{\sqrt{3}}{2}n_3 \left\{ \frac{1}{\delta + n} \left[(\delta + 1) \left(\frac{\rho}{r_1}\right)^\delta \left(\frac{r_0}{r_1}\right)^n - (1 - n) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n 2K\tau_s \right] + \left(\frac{1}{n} - 1\right) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n 2K\tau_s \right\} \varphi_2 + \\ + \sqrt{3}n_3 \left(\frac{1}{n} - 1\right) \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n 2K\tau_s - \frac{n_3}{2\mu} \left[1 - \frac{2\mu}{r_0 \sin \alpha} (r_0 \cos \alpha - \rho \cos \theta) \right] \varphi_3; \\ \frac{\sigma_\rho}{\sigma_s} = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_s} + \left(\frac{r_0}{\rho}\right)^n 2K\tau_s. \end{cases} \quad (2.9)$$

С использованием формул (2.8) и (2.9) на рис. 2.25 построена диаграмма, характеризующая изменение напряжений по высоте очага для частного случая раскатки.

Сравнение этой диаграммы с ранее полученными экспериментальными результатами [111] позволяет утверждать, что выведенные формулы отражают напряженное состояние в очаге деформации при процессе раскатки.

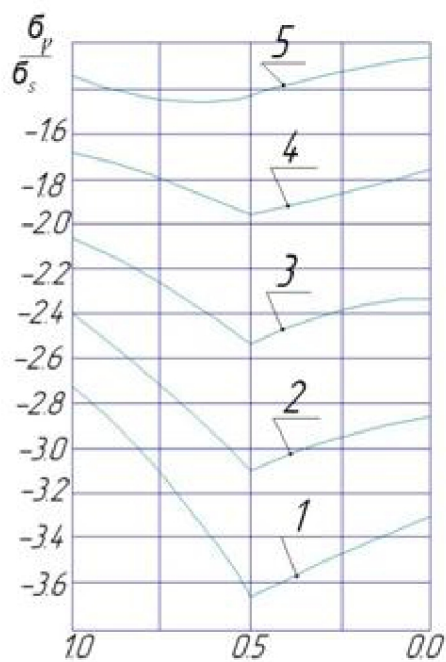


Рис. 2.25. Изменение напряжений по длине очага деформации при раскатке

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Определяющими технологическими параметрами формоизменяющих процессов при производстве кольцевых заготовок авиационных двигателей являются:

деформационные режимы, обеспечивающие однородность структуры и высокие механические свойства по высоте и ширине профиля;

геометрические факторы очага деформации, влияющие на неоднородность металла; кинематические условия процесса раскатки; термомеханические режимы; силовые параметры процесса.

Для выбора оптимальной схемы напряженно-деформированного состояния необходимо иметь зависимости, связывающие высоту заготовки до и после деформации со скоростью процесса, геометрическими и масштабными факторами, которые позволили бы получить заданную структуру и свойства металла колец.

Важным фактором, который решающим образом влияет на неоднородность очага деформации при раскатке колец, является величина обжатий со стороны большого и малого валков.

Для правильного назначения термомеханических параметров раскатки необходимо знать кинематические условия процесса, которые необходимы также при решении задач по автоматизации процесса раскатки.

Вопросы разработки технологии изготовления экономичных и качественных профилей не могут быть решены без наличия диаграмм пластичности и рекристаллизации. Однако эти диаграммы для выбранных типовых сплавов ХН68ВМТЮК-ВД, ХН45МВТЮБР-ИД, ВТ9 и ВТ20 или отсутствуют, или устарели, вследствие совершенствования технологии производства полуфабрикатов на металлургических предприятиях.

Одним из основных процессов, влияющих на экономичность и качество колец, является процесс получения исходной заготовки. Изучение и выбор оптимальной схемы напряженно-деформированного состояния при ковке дает возможность активно влиять на качество готовой продукции.

Несмотря на значительное количество работ по исследованию очага деформации при ковке, выполненных авторами С.И.Губкиным [92], Н.И.Корнеевым [93], М.В.Сторожевым и Е.А.Поповым [89] и др., зависимости для определения силовых параметров с учетом неоднородности деформации практически отсутствуют.

Решению задач по нахождению указанных технологических параметров и посвящена данная глава.

3.1. Разработка зависимости, описывающей глубину зон распространения интенсивной деформации при раскатке колец авиационных двигателей

Процесс формирования структуры и механические свойства при обработке металлов давлением являются функцией ряда параметров: степени деформации, температуры, физико-механических свойств металла, характера течения металла в

очаге деформации, геометрии формоизменяющих элементов. Особенно важно знание условий распространения пластической деформации по высоте заготовки при раскатке.

Это распространение, как было установлено ранее, можно описать, по крайней мере, тремя зонами:

- полной пластической деформации, что соответствует абсолютной фрагментации кристаллов;
- смешанной деформации, соответствующей избирательной фрагментации кристаллов;
- упругих деформаций.

Глубину проникновения пластической деформации ограничим нижней границей зоны избирательной фрагментации.

В разное время и разными авторами был предложен ряд формул для определения глубины проникновения пластической деформации как функции различных параметров прокатки [78, 91].

В качестве примера приведем две формулы:

Сен-Жуй-Юй

$$h_g^{(p)} = k \frac{e^\alpha + \beta \frac{H_0}{R}}{1 + \gamma H_x} \quad (3.1)$$

Тарновского-Котельникова

$$h_g^{(p)} = c \sqrt{B_0 e_y} = c \sqrt{B_0 R \Delta h}, \quad (3.2)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, c, k$ - числовые параметры;

R - радиус валков;

Δh - абсолютное обжатие;

H_0, H_x - высота до и после обжатия;

l_g - длина дуги захвата;

B_0 - исходная ширина профиля.

Эти формулы отражают глубину распространения пластической деформации при прокатке. Кроме того, что эти формулы эмпирические, они обладают еще и тем недостатком, что закономерности, найденные при деформации малых образцов, зачастую не подтверждаются данными по деформированию реальных заготовок. Вместе с тем они не отражают связи со структурными изменениями в реальной заготовке. В подтверждение указанных недостатков можно привести результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных, полученных в работе [78]. Анализ зависимостей (3.1), (3.2) позволяет констатировать весьма значительные относительные погрешности. Так, уравнение (3.1) дает относительную погрешность в пределах -27,9...+189,1%, а уравнение (3.2) -55,7...+85,1%.

Выгодно от приведенных формул отличается уравнение, предложенное А.И.Мурзовым [78]:

$$h_g^{(p)} = \frac{c(H_0^2 - H_x^2)}{2^n H_x}, \quad (3.3)$$

где n - масштабный коэффициент, $n = 3$;

c - коэффициент.

В этой формуле коэффициент k выражает влияние диаметра валков.

Уравнение (3.3) позволяет производить расчеты с относительной погрешностью - 17,5...+18,0% [78]. Ввиду этого возьмем уравнение (3.3) за основу.

Однако предложенная формула может быть использована только для процесса прокатки листов. В то же время раскатка включает кроме прокатки еще и осадку. Поэтому формула (3.3) должна быть скорректирована применительно к процессу раскатки.

Структуру формулы (3.3) сохраним. Корректировку проведем за счет введения дополнительного коэффициента k , учитывающего влияние процесса осадки.

Для выполнения корректировки формулы (3.3) необходимо знать влияние процесса осадки и высоты раскатываемой заготовки на распространение пластической деформации по глубине профиля реального кольца.

Высотное распространение пластической деформации изучалось посредством металлографического анализа структуры.

В качестве материала для исследования использовались кольцевые заготовки из сплава АМг6 в литом состоянии. Раскатка производилась при температуре 440...450°C на раскатной машине модели РМ1200 с диаметрами валков: верхнего - 550 мм и нижнего - 200 мм. Скорость прокатки соответствовала 1,5 м/с, скорость осадки изменялась в пределах 0...16 мм/с.

Результаты эксперимента для случая максимальной скорости осадки приведены в табл. 3.1.

Исследованиями установлено, что помимо зоны с мелкозернистой упрочненной структурой около поверхности, глубиной 1...2 мм, имеются зоны смешанной структуры с постепенным переходом к литой, толщиной примерно равной интенсивно деформированной зоне.

Увеличение числа пропусков (оборотов) показало, что поверхностный слой мелкозернистой структуры увеличивается незначительно, а деформированная зона увеличивается с уменьшением толщины полосы.

Установлено, что при изменении отношения скорости осадки к скорости прокатки в пределах 0..0,01 глубина распространения пластической деформации в сравнении с процессом прокатки изменяется в диапазоне 1,0...3,2. Эта величина и является коэффициентом k , учитывающим влияние процесса осадки. Причем зависимость коэффициента k от отношения скоростей прямолинейна (рис. 3.1).

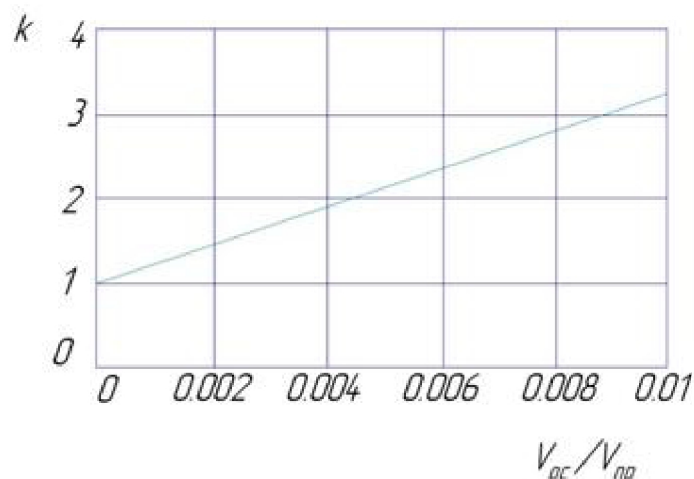


Рис. 3.1. Изменение коэффициента влияния процесса осадки в зависимости от отношения скорости осадки (V_{oc}) к скорости прокатки ($V_{пр}$)

Кроме этого, исследованиями установлены численные значения масштабного фактора. Масштабный коэффициент n при высоте профиля H_0 не более 100 мм равен 2, а при H_0 более 100 мм $n = 3$.

Исследования позволили скорректировать уравнение (3.3) применительно к процессу совмещенной деформации, которое приняло следующий вид:

$$h_s^{(p)} = \frac{c(H_0^2 - H_x^2)}{2^n H_x} k, \quad (3.4)$$

где c - коэффициент, выражающий влияние диаметров валков, при среднем диаметре валков менее 750 мм $c = 1,1$ при среднем диаметре валков равном 750...900 мм $c = 1,1$ [77].

Таблица 3.1. Результаты структурных изменений зон очага деформации при раскатке и сходимость глубин
проникновения пластической деформации с расчетными данными

Высота профиля H_0	Высота профиля H_x	Деформа- ция %	Глубина зон для одного вала h_g			Глубина зоны 4	Глубина зоны 2 $h_{g^{(p)}}$	Абс. по- грешн $h_{g^{(p)}} - h_g$	Отно- грешн $\frac{h_{g^{(p)}} - h_g}{h_g}$
			Зона 1	Зона 2	Зона 3				
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	
80	76,7	5,2	1,0	5,7	10,0	46,6	5,4	-0,3	-5,26
80	71,5	10,6	1,0	16,6	18,0	28,8	14,0	-2,6	-15,68
80	64,9	19,0	1,5	22,8	24,8	-	27,0	+4,5	+18,43
80	46,3	42,1	2,0	-	-	-	73,8	-	-
80	39,1	51,2	2,0	-	-	-	100,0	-	-
40	38,1	4,9	1,0	3,4	7,0	19,2	3,2	-0,2	-5,88
40	35,9	10,2	1,0	8,2	10,8	-	6,9	-1,3	-15,84
40	31,9	20,1	1,5	13,6	4,9	-	15,0	+1,4	+10,3
40	23,6	41,0	2,0	-	-	-	35,4	-	-
40	19,8	50,4	2,0	-	-	-	48,9	-	-

Таким образом, получена зависимость, описывающая глубину зон интенсивной пластической деформации при комплексном воздействии в очаге на металл процессов прокатки и осадки.

Сходимость экспериментальных данных с результатами расчета, выполненного с использованием уравнения (3.4), приведена в табл. 3.1. Относительная погрешность находится в диапазоне -15,8...+18,4%, что является вполне приемлемым для инженерных расчетов.

Для облегчения технологических расчетов уравнение (3.4) представим в виде номограммы. Для построения номограммы зависимость (3.4) удобнее переписать в виде

$$\frac{h_g^{(p)}}{H_x} = \frac{ck}{2^2} \left(\frac{H_0^2}{H_x^2} - 1 \right). \quad (3.5)$$

Значение H_0 / H_x находится с использованием правой нижней части номограммы (рис. 3.2). Затем правая верхняя часть этой номограммы для конкретного соотношения $cK / 2n$ позволяет получить величину $\frac{h_g^{(p)}}{H_x}$, исходя из которой по левой части номограммы для конечных толщин профиля H_x определяется глубина зоны пластической деформации $h_g^{(p)}$.

3.2. Исследование влияния геометрических факторов на величину обжатия при раскатке колец авиационных двигателей

Одним из определяющих факторов при исследовании неоднородности очага деформации применительно к раскатке кольцевых профилей в валках неравного диаметра является величина обжатий со стороны малого и большого валков. Этот фактор процесса в настоящее время мало изучен.

$$a_R = \frac{R_B}{R_H}; \quad (3.8)$$

$$a_l = \frac{l_H}{l_B};$$

$$a_R = \frac{R_B}{R_H}; \quad (3.9)$$

$$a_d = \frac{r_k}{R_H},$$

где l_H, l_B - длины дуг захвата у нижнего и верхнего валков;

a_l - коэффициент дуги захвата;

a_R - коэффициент разницы диаметров валков;

a_d - коэффициент кривизны кольца.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.4.

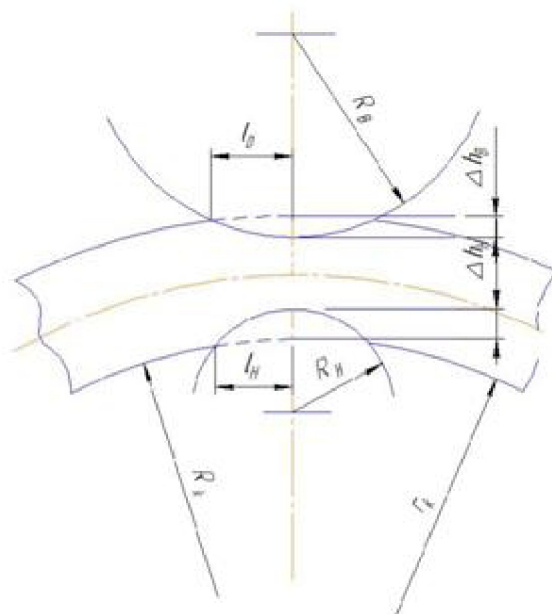


Рис. 3.3. Схема формоизменения кольцевой полосы

Анализируя графики, приведенные на рис. 3.4., можно заключить, что характер кривой $a_l = f(a_d)$ приближается к гиперболе и на этом основании может быть описан следующим уравнением [110]:

$$a_l = \frac{ma_d + n}{pa_d + q}, \quad (3.10)$$

где m, n, p, q - постоянные величины.

Зная вид функции $a_l = f(a_d)$, методом выравнивания найдем эмпирическую зависимость между a_l и a_d .

На кривой рис. 3.4 для $a_R = 2.0$ выберем точку с координатами (1,0; 3,85) и аппроксимируем

$$a_l' = \frac{a_d - 1.0}{a_l - 3.85}. \quad (3.11)$$

Расчеты аппроксимации сведены в табл. 3.2.

Для проверки пригодности уравнения (3.11) строим график зависимости между a_l и a_d (рис. 3.5).

Анализируя рис. 3.5, можно утверждать об удовлетворительном совпадении экспериментальных точек с прямой:

$$a_l' = 0.30 - 0.337a_d.$$

Тогда зависимость между a_l' и a_d будет иметь вид

$$a_l^{(p)} = 3.85 + \frac{a_d - 1.0}{0.30 - 0.337a_d}. \quad (3.12)$$

Проанализируем полученную функцию (3.12) на сходимость с экспериментальными данными. Расчеты сходимости приведены в табл. 3.3.

Относительная погрешность расчетных коэффициентов $a(p)$ в сравнении с экспериментальными данными коэффициентов a_t (см. табл. 3.3) находится в интервале $-3,67...+5,09$, т.е. весьма незначительна.

Проделав аналогичные расчеты для коэффициентов разницы диаметров валков равных 2,94 и 4,57 (см. табл. 3.3), получили следующие зависимости между $a_l^{(p)}$ и a_d :

для $a_R = 2.94$

$$a_l^{(p)} = 5.64 + \frac{a_d - 1.0}{0.20 - 0.206a_d}; \quad (3.13)$$

для $a_k = 4.57$

$$a_l^{(p)} = 7.15 + \frac{a_d - 1.0}{0.15 - 0.159a_d}. \quad (3.14)$$

Используя известные формулы для определения дуг захвата применительно к прокатке в валках разного диаметра [79], можно записать, что длины дуг

$$l_H = \sqrt{\frac{2r_k R_H}{r_k - R_H} \Delta h_H}, \quad (3.15)$$

$$l_H = \sqrt{\frac{2R_k R_B}{R_k + R_B} \Delta h_B}. \quad (3.16)$$

Таблица 3.2. Расчет аппроксимации уравнения (3.11) для $a_R = 2$

ad	al	ad-1,0	al-3,85	$a_I^i = \frac{a_d - 1.0}{a_I - 3.85}$
1,00	3,85	0,00	0,00	0,00
1,25	1,78	0,25	-2,07	-0,12
1,80	1,18	0,80	-2,67	-0,30
2,88	1,09	1,88	-2,76	-0,68
4,50	1,00	3,50	-2,85	-1,23

Таблица 3.3. Расчет сходимости функции (3.12)
с экспериментальными данными

ad	ad-1,0	0,3-0,337ad	$\frac{a_d - 1.0}{0.3 - 0.337}$	$a_I^{(p)}$	a_I	$\Delta a_I = a_I^{(p)}$	$\frac{\Delta a_I}{a_I} \cdot 100\%$
1,00	0,00	-0,037	0,00	3,85	3,85	0,00	0,00
1,25	0,25	-0,121	-2,07	1,78	1,78	0,00	0,00
1,80	0,80	-0,307	-2,61	1,24	1,18	0,06	5,09
2,88	1,88	-0,671	-2,80	1,05	1,09	-0,04	-3,67
4,50	3,50	-1,220	-2,87	0,98	1,00	-0,02	-2,00

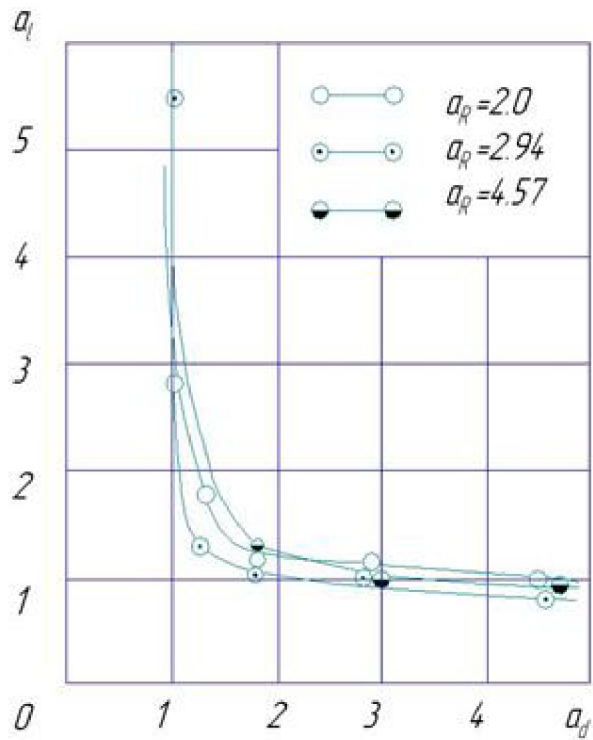


Рис. 3.4. Зависимость коэффициента дуг от коэффициента кривизны кольца

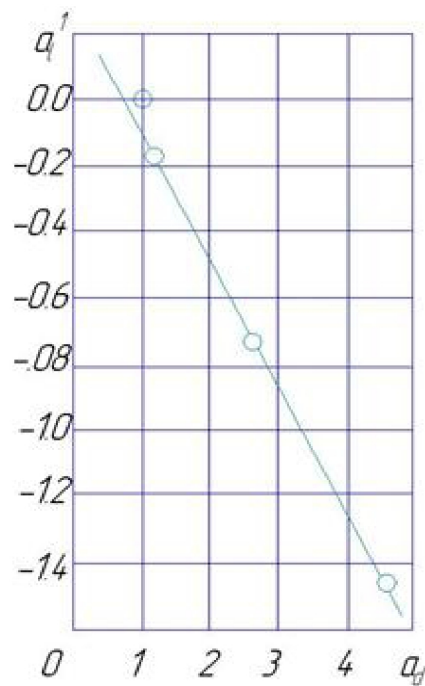


Рис. 3.5. График проверки пригодности уравнения (3.11)

Разделив левую и правую части уравнения (3.15) на соответствующие части уравнения (3.16), получим с учетом (3.7), (3.8), (3.9) соотношение между обжатиями у верхнего и нижнего валков:

$$\Delta h_H = \frac{\alpha_I^2 \alpha_R R_k (r_k - R_H)}{r_k (R_k + R_B)} \Delta h_B. \quad (3.17)$$

Для упрощения записи выражения (3.17) введем обозначение

$$\alpha_\Sigma = \frac{\alpha_I^2 \alpha_R R_k (r_k - R_H)}{r_k (R_k + R_B)}, \quad (3.18)$$

тогда $\Delta h_{II} = \alpha_\Sigma \Delta h_B$.

Для связи обжатия у валков с суммарным обжатием произведем следующие преобразования:

$$\Delta h_\Sigma = \Delta h_B + \Delta h_{II} = \Delta h_B + \alpha_\Sigma \Delta h_B = \Delta h_B (1 + \alpha_\Sigma)$$

$$\text{или } \Delta h_B = \frac{\Delta h_\Sigma}{1 + \alpha_\Sigma}, \quad (3.19)$$

где Δh_Σ - общая деформация криволинейной полосы. Для случая $l_B = l_H$ можно записать

$$\Delta h_H = \frac{\alpha_R R_k (r_k - R_H)}{r_k (R_k + R_B)} \Delta h_B. \quad (3.20)$$

Таким образом, зная коэффициенты разницы диаметров валков и кривизны кольца с использованием зависимостей, аналогичных уравнениям (3.12), (3.13), (3.14) можно определить обжатия со стороны верхнего и нижнего валков, что позволяет рассчитать глубину зон пластической деформации при раскатке кольцевых профилей с учетом кривизны кольца и диаметра рабочих валков.

3.3. Кинетика и геометрические параметры процесса раскатки колец авиационных двигателей

Несмотря на то, что процесс изготовления колец состоит изковки исходной заготовки и раскатки, в данном разделе изучается только процесс раскатки. Это объясняется тем, что операцииковки изучены достаточно полно [74, 89, 92, 92]. По характеру формоизменения процесс раскатки колец авиационных двигателей можно разделить на три стадии: выведение разностенности кованой заготовки, интенсивная ее раскатка и докатка, т.е. окончательное формирование геометрии кольца.

Первая стадия характеризуется началом деформации кольца, наблюдается сбивание огранки и выведение разностенности. Обжатия при этом составляют незначительную величину 0,1...0,5 мм/об, которые увеличиваются по мере устранения геометрических несовершенств кольца. Скорость раскатки на данной стадии должна соответствовать 0,5...1,0 м/с.

После выведения разностенности процесс переходит во вторую стадию раскатки, он осуществляется с максимально возможными скоростями 1,0...2,5 м/с и обжатиями. Максимальное обжатие необходимо для обеспечения

термомеханических условий получения однородной структуры и формирования геометрии профиля кольца. Обжатия при этом составляют 0,5...5,0 мм/об.

Третья стадия раскатки характеризуется применением малых обжатий 0,05...0,2 мм/об, обеспечивающих точную докатку профиля и диаметральных размеров кольца, скорость раскатки при этом должна находиться в пределах 0,5... 1,0 м/с.

Теперь рассмотрим кинематику процесса раскатки.

В процессе раскатки постоянно происходит изменение диаметра и толщины профиля кольца при неизменной его ширине. Поэтому удобнее пользоваться их графической зависимостью, которая получается из известной формулы

$$D = \frac{V}{\pi B S}, \quad (3.21)$$

где D - текущий диаметр кольца;

S - текущая толщина сечения кольца;

V - объем кольцевой заготовки;

B - ширина профиля кольца.

Обозначив величину $\frac{V}{\pi B}$ через коэффициент C - уравнение (3.21) можно записать

в виде

$$D = \frac{C}{S}. \quad (3.22)$$

На рис. 3.6 приведены примеры графического построения зависимости (3.22). В явном виде просматриваются описанные ранее стадии раскатки кольцевых заготовок. Данный график позволяет правильно, с учетом стадий процесса, выбирать деформационно-скоростные режимы раскатки. Например, при больших диаметрах раскатанного кольца процесс необходимо вести на малых скоростях и с минимальными обжатиями.

Предварительный анализ показывает, что характер изменения диаметра кольца в процессе раскатки с достаточной достоверностью может быть описан уравнением спирали:

$$\rho = \frac{a\varphi}{2\pi}, \quad (3.23)$$

где ρ - текущий радиус;

φ - угол поворота;

a - шаг спирали.

Применительно к процессу раската уравнение (3.23) перепишем в виде

$$R = \frac{\Delta R \varphi}{2\pi}, \quad (3.24)$$

где R - текущий средний радиус кольца;

ΔR - приращение радиуса кольца.

Используя зависимость (3.23), выразим ΔR в виде

$$\Delta R = \frac{C}{2S} - \frac{C}{2S + \Delta S} = C \frac{S + \Delta S - S}{2S(S + \Delta S)} = C \frac{\Delta S}{2S(S + \Delta S)}. \quad (3.25)$$

Подставив зависимость (3.25) в уравнение (3.24), получим уравнение, описывающее кинематику процесса раскатки колец:

$$R = \frac{V}{4\pi^2 B} \cdot \frac{\Delta S}{S(S + \Delta S)} \varphi. \quad (3.26)$$

Уравнение (3.26) получено для кольцевых профилей прямоугольного сечения, но оно может быть с успехом использовано и для колец профильного сечения. Для этого необходимо произвести пересчет профиля на эквивалентную толщину прямоугольного сечения.

Как уже отмечалось, процесс раскатки бесшовных кольцевых профилей есть совокупность двух процессов - процесса прокатки и одновременной осадки, что накладывает свои особенности как на кинетику процесса, так и на ее механику.

В частности, это хорошо видно по запасу мощности раскатного стана.

В зависимости от физической природы материала и сечения кольца используемые в промышленности станы для раскатки колец авиационных двигателей можно подразделить на станы с большим избытком мощности и с мощностью, близкой в потребной (малой мощности).

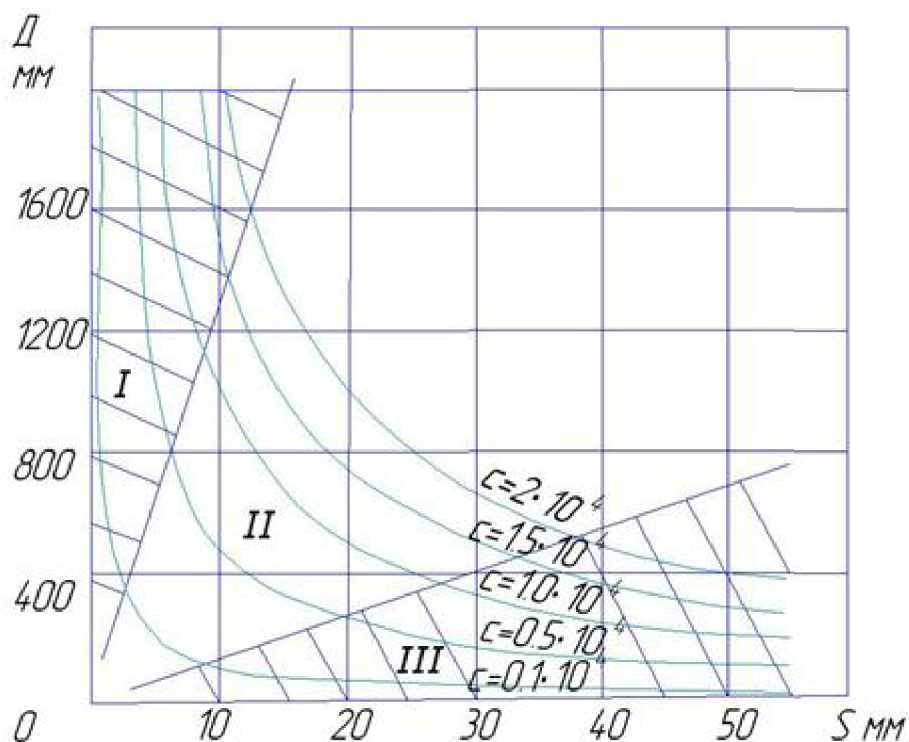


Рис. 3.6. Изменение диаметра раскатываемого кольца в зависимости от его толщины

Рассмотрим особенности ведения процесса в указанных случаях.

Обжатия при раскатке кольцевых профилей могут осуществляться либо по схеме, приведенной на рис. 3.7а, либо по схеме, приведенной на рис. 3.7б. Вариант схемы рис. 3.7а соответствует условиям раскатки с достаточным запасом как по мощности главного привода, так и по усилию нажимного устройства кольцепрокатного стана. Процесс на первом обороте кольца аналогичен прокатке на клин, затем за следующий оборот производится выравнивание толщины профиля. Данный процесс повторяется многократно.

Вариант по схеме рис. 3.7б характерен для раскатки на маломощных станах. Усилие раскатки при этом остается неизменным на протяжении всего процесса, температура металла кольца снижается, сопротивление деформации возрастает. Процесс на первом обороте аналогичен предыдущему варианту, затем производится также прокатка на клин, но с уменьшением обжатий по длине периметра кольца до выравнивания разнотолщинности в конце раскатки.

Для расширения возможности по управлению процессом необходимо создание специальных станов с достаточным запасом мощности.

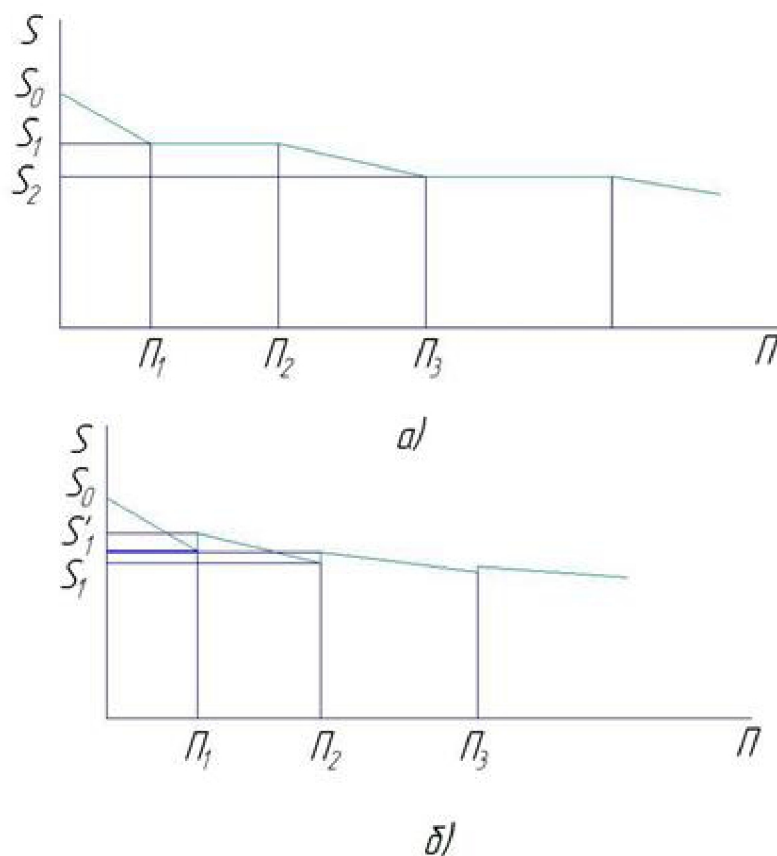


Рис. 3.7. Характеристика обжатий при совмещенной деформации:
 а) при достаточном запасе мощности раскатного стана;
 б) при раскатке на маломощном стане;
 S_0, S_1 – толщины катаемого профиля;
 Π_1, Π_2 – периметры катаемого кольца

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЛИБРАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ КАЛИБРОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ЗАГОТОВОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В результате определения основных технологических параметров процесса изготовления кольцевых профилей авиационных двигателей были выявлены предпочтительный очаг деформации, кинематические условия и термомеханические режимы процесса раскатки.

Теперь необходимо создать деформирующий инструмент, который позволил бы реализовать полученные результаты.

В данном случае для процесса раскатки это выражается в установлении определенных схем и расчетных методов калибрования кольцевых профилей.

Таким образом, схема и методы калибрования являются одним из основных параметров, определяющих процесс.

Для создания оптимальных калибровок необходимо обеспечить следующие условия: выбор схемы калибрования, подбор оптимальной формы калибров, их хорошее сочленение. При этом следует стремиться к минимальному количеству калибров. Вытяжки, механические свойства во всех компонентах профиля должны быть равны, форма калибра должна быть заполнена металлом полностью, но образование заусенцев недопустимо.

В основу разработки методов калибровки положены известные теоретические закономерности отечественных и зарубежных ученых, полученные при изучении продольной прокатки [69...72].

Однако эти работы только частично освещают вопросы профильной раскатки ввиду того, что этот процесс имеет существенное отличие от процесса продольной прокатки. При раскатке колец, в результате сближения верхнего валка с нижним, высотные размеры профиля уменьшаются, а диаметр увеличивается. Следовательно, в этом случае схема напряженного состояния, силовые параметры и структура меняются с каждым оборотом кольца.

В целях изыскания и создания высокоэффективного метода раскатки профильных колец авиационных двигателей в данном разделе описано: влияние геометрических размеров заготовки, формы калибров и схемы последовательного изменения профиля на структуру, механические свойства и коэффициент использования металла.

Раскатка колец производилась на раскатной машине модели РМ1200. Материалом служили жаропрочные (ХН68ВМТЮК-ВД, ХН45МВТЮБР-ИД) и титановые (ВТ9, ВТ20) сплавы.

4.1. Сортамент кольцевых профилей авиационных двигателей

Вся номенклатура кольцевых профилей отечественного авиационного двигателестроения составляет более 10 000 наименований.

Для того чтобы определиться с направлениями по разработке методик многокалиберной раскатки, вся упомянутая номенклатура кольцевых профилей

может быть классифицирована по способу калибровки в четыре группы, которые объединяют 17 подгрупп (табл. 4.1):

- 1) кольца прямоугольного и незначительно отличающиеся от прямоугольного профиля:
 - 1.1) собственно прямоугольные,
 - 1.2) незначительно отличающиеся от прямоугольных,
 - 1.3) конические;
- 2) кольца швеллерные с тонкими высокими фланцами:
 - 2.1) швеллерные с наружными фланцами,
 - 2.2) швеллерные с внутренними фланцами,
 - 2.3) Г-образные с наружными фланцами,
 - 2.4) Г-образные с внутренними фланцами,
 - 2.5) полутор с наружными фланцами,
 - 2.6) полутор с внутренними фланцами;
- 3) кольца швеллерные и балочные с толстыми фланцами:
 - 3.1) швеллерные с наружными фланцами,
 - 3.2) швеллерные с внутренними фланцами,
 - 3.3) балочные;
- 4) кольца тавровые:
 - 4.1) тавровые с наружным фланцем,
 - 4.2) тавровые с внутренним фланцем,
 - 4.3) крестообразные,
 - 4.4) спаренные тавровые с наружными фланцами,
 - 4.5) спаренные тавровые с внутренними фланцами.


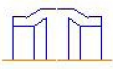

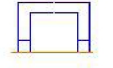
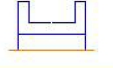
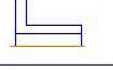
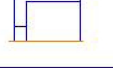

Все эти кольцевые профили изготавливаются из жаропрочных на никелевой основе, титановых и других сплавов.

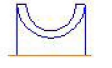
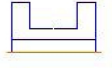
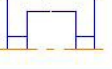
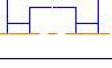
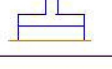




Приведенные в табл. 4.1 группы кольцевых профилей примерно по распространенности в конструкции современного авиационного двигателя подразделяются следующим образом: 1 - 40%; 2 - 30%; 3 - 25%; 4 - 5%.

Рассмотрим кольца различных групп.

Первая группа представляет собой кольца простого сечения, изготовление которых технологически не представляют особых затруднений. Как показал опыт их изготовления, они могут быть получены по однокалиберной схеме калибровки с обеспечением необходимых физико-механических эксплуатационных характеристик, поэтому в работе основное внимание уделено вопросам изготовления колец 2...4 групп.

Таблица 4.1 Классификация кольцевых профилей

<i>Номер группы</i>	<i>Номер подгруппы</i>	<i>Тип профиля</i>
1	2	3
1	11	
	12	
	13	
2	21	
	22	
	23	
	24	
	25	

1	2	3
2	2,6	
3	3,1	
	3,2	
	3,3	
4	4,1	
	4,2	
	4,3	
	4,4	
	4,5	

Необходимо было установить возможность их получения по однокалиберной и многокалиберной схемам с обеспечением вышеприведенных условий калибрования, а также низкого очага деформации.

4.2. Исследование схем калибровок при раскатке профильных кольцевых заготовок авиационных двигателей

Как установлено ранее, для обеспечения высокого качества кольца необходим низкий очаг деформации. Рассмотрим, можно ли его получить при однокалиберной либо многокалиберной раскатке применительно к фланцевым заготовкам. В случае необходимости многокалиберной раскатки следует установить число и последовательность калибров.

Кроме того, необходимо знать влияние формы инструмента на механические свойства и структуру кольцевых изделий. В частности, нужно изучить влияние раскатки с уширением и без уширения закрытого швеллерного профиля и аналогичного профиля со стесненной деформацией.

В случае однокалиберной схемы в качестве примера рассмотрим использование заготовки с высоким очагом деформации 0200x080x58. В случае многокалиберной схемы воспользуемся заготовкой с низким очагом деформации 0256x0216x85.

Температурные режимы раскатки заготовок приведены в табл. 4.2. Эти режимы выбирались с учетом получения в горячем состоянии необходимой технологической пластичности и высокой однородности структуры и повышенных свойств.

Раскатка по многокалиберной схеме применительно к промежуточному кольцу дисков компрессора высокого давления производилась в специально разработанной оснастке в четыре перехода. Раскатка по однокалиберной схеме производилась в чистовом калибре той же калибровки.

Метод последовательного получения окончательной формы кольца включает в себя не менее 3-4 переходов, как будет показано ниже. Поэтому рассмотрим четырехкалиберную схему калибровки.

Раскатка по четырехкалиберной схеме обеспечивает высокую заполняемость калибра, коэффициент использования металла возрос с 0,15 до 0,4, трудоемкость снизилась на 30% (рис. 4.2).

В результате исследований также установлено, что раскатка кольцевых заготовок на гладкой бочке в ящичных калибрах и П-образных с уширением из высоких заготовок, т.е. с высоким очагом деформации, дает пониженные механические свойства и неоднородную грубую структуру. Раскатка колец в тех же случаях, но из заготовок с низким очагом деформации и без уширения, способствует измельчению зерен и повышению механических свойств.

В табл. 4.3 приведены сравнительные механические свойства. Из этой таблицы явствует, что более высокие механические свойства получены по второму способу. Это объясняется тем, что процесс раскатки при втором способе обеспечивает более полное протекание в объеме сдвиговой деформации. В результате динамической, спонтанной и статической рекристаллизации зерно в основном растет из зародышей и формируется в более мелкие зерна равной величины. Расчет калибровки валков по методу балки позволяет получать профили с открытыми фланцами (рис. 4.3) при

соотношениях геометрических параметров профиля:

$$\frac{h_{\delta}}{a_{\delta}} \leq 2,0 \dots 2,5; \frac{2\dot{a}_{\delta}}{b_{\delta}} \geq 0,30 \dots 0,55; \frac{S_0 - S_{\delta}}{h_{\delta}} \geq 2,3 \dots 2,8, \quad (4.1)$$

где h_{δ} - высота фланца; \dot{a}_{δ} - толщина фланца;

b_{δ} - ширина шейки;

S_0 - высота профиля исходной заготовки;

S_{δ} - толщина шейки.

Для профилей с закрытыми фланцами (рис. 4.4) эти соотношения выглядят следующим образом:

$$\frac{h_{\delta}}{a_{\delta}} \leq 1,5 \dots 2,0; \frac{2\dot{a}_{\delta}}{b_{\delta}} \geq 0,30 \dots 0,55; \frac{S_0 - S_{\delta}}{h_{\delta}} \geq 2,3 \dots 2,8. \quad (4.2)$$

При величинах соотношений (4.1), (4.2), не укладывающихся в указанные диапазоны для швеллерных профилей, что соответствует второй группе классификатора, необходимо использовать комплексный метод одновременной раскатки со сверткой.

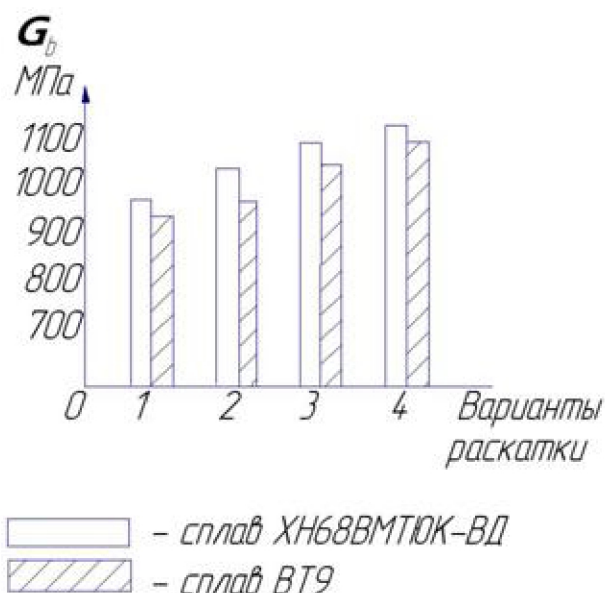


Рис. 4.1. Диаграмма зависимости прочности раскатных колец от схемы напряженного состояния (формы инструмента) для сплавов XH68BMTЮК-ВД и BT9:

- раскатка на гладких валках с уширением;
- раскатка в ящичном калибре без уширения;
- раскатка в П-образном калибре с уширением из заготовки с высоким очагом деформации;
- раскатка в П-образном калибре без уширения с боковым обжатием из заготовки с низким очагом деформации

Этот метод позволяет получать кольца со следующими соотношениями геометрических параметров для принятых сплавов (см. рис. 4.3):

$$\frac{h_{\delta}}{a_{\delta}} \leq 10; \frac{2\dot{a}_{\delta}}{b_{\delta}} \geq 0,30; \frac{S_0 - S_{\delta}}{h_{\delta}} \geq 0,20. \quad (4.3)$$

Исследованиями В.Н.Зиновьева [18] были установлены ограничения на метод однокалиберной раскатки тавровых профилей. Этот метод позволяет выполнить профили с отношением ширины фланца к общей ширине профиля (рис. 4.6).

$$\frac{a_{\phi}}{B} = 0,25 \dots 0,75 \text{ при отношении высоты фланца к его толщине } \frac{h_{\phi}}{a_{\phi}} = 0,73 \dots 1,79.$$

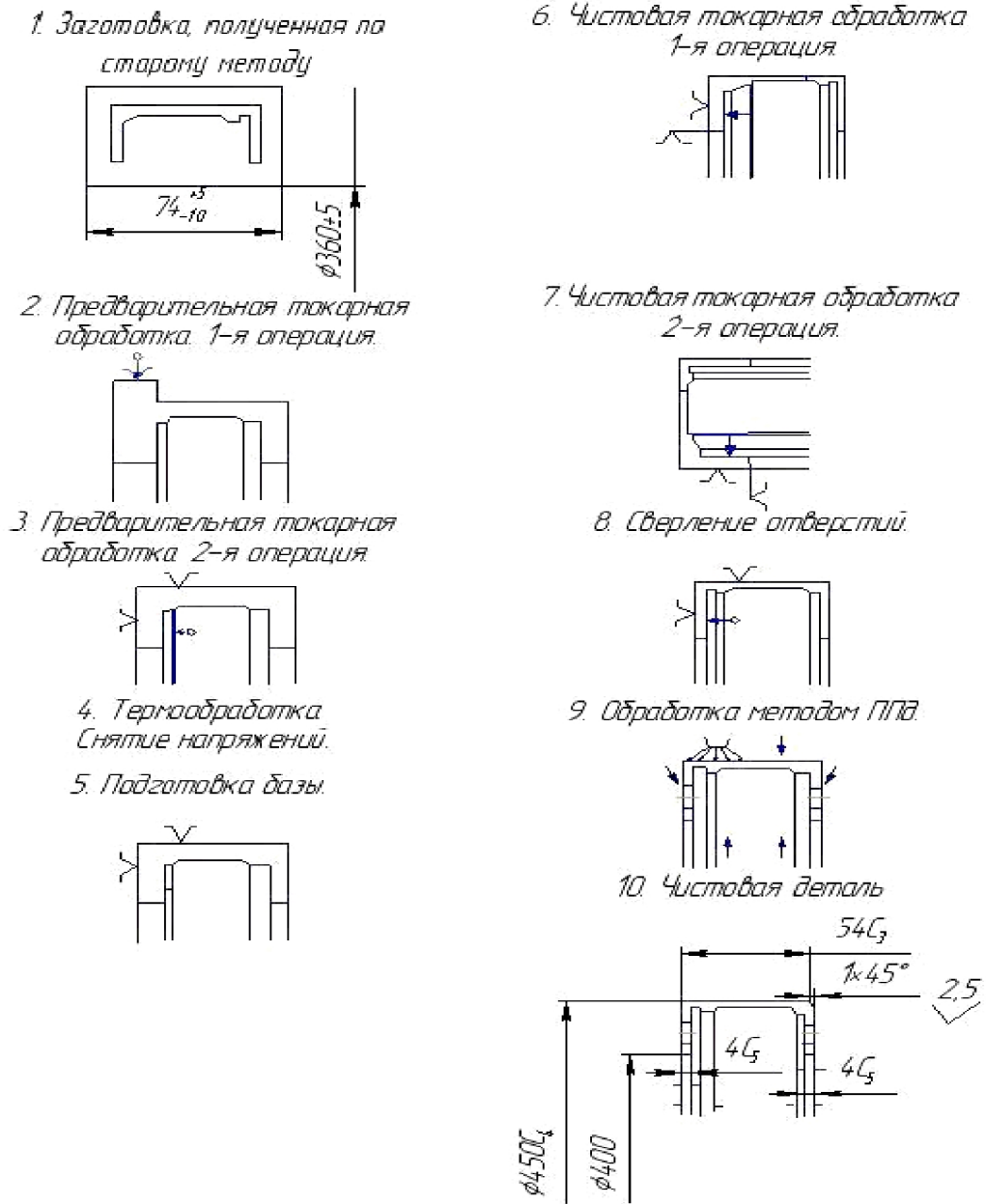


Рис. 4.2. Технологическая схема изготовления промежуточного кольца диска компрессора из сплава ХН68ВМТКЖ-ВД: операции 1...10- при использовании заготовки, полученной по однокалиберной схеме раскатки; операции 5...10- при использовании заготовки, полученной по четырехкалиберной схеме

Таблица 4.2 Температурно-временные режимы раскатки колец

Марка сплава	Наимен. операции раскатки	Темпер., °C		Время выдержки, мин.
		начало деформации	конец деформации	
ХН68ВМТЮ-ВД	<i>Для тонкостенных заготовок</i>			
	Ящичный калибр	1000	800	20..25
	Разгонный калибр	1160	950	20..25
	Предчистовой калибр	1000	800	15..20
	чистой калибр	1000	800	10..15
	<i>Для толстостенных заготовок</i>			
	1 переход	1160	950	50..60
2 переход	1160	950	10..15	
3 переход	1160	950	10..15	
ВТ9	<i>Для тонкостенных заготовок</i>			
	Ящичный калибр	950	800	15..20
	Разгонный калибр	980	850	15..20
	Предчистовой калибр	950	800	10..15
	чистой калибр	950	800	10..15
	<i>Для толстостенных заготовок</i>			
	1 переход	980	850	30..40
2 переход	980	850	10..15	
3 переход	980	850	10..15	

Границы при этом состоянии становятся более тонкими и атомные связи между зернами за счет этого повышаются. Замечено также, что избыточные фазы разделяются на мелкие фрагменты и распределяются равномерно по объему металла. Это обеспечивает повышение не только прочностных, но и пластических свойств.

Снижение механических свойств при раскатке на гладких валках с уширением объясняется образованием гетерогенных и грубых структур.

На основании вышеприведенных сравнительных исследований можно утверждать, что явными преимуществами обладает схема раскатки с низким очагом деформации в стесненных условиях. Она обеспечивает повышенные механические свойства, так как стесненный метод деформирования создает более высокое напряженное состояние и способствует получению более тонких ажурных профилей, максимально приближенных по геометрии к окончательным размерам детали.

На основе проведенных исследований можно дать несколько рекомендаций:

для получения равномерной структуры и зерна заданной величины при раскатке колец из жаропрочных сплавов типа ХН68ВМТЮК-ВД, ХН45МВТЮБР-ИД и титановых сплавов типа ВТ9 и ВТ20 температурный интервал следует выбирать с учетом обеспечения конца деформации ниже порога рекристаллизации;

для обеспечения высокой пластичности и прочности раскатку колец следует производить из заготовок с низким очагом деформации в калибрах со стесненными условиями деформации.

Таблица 4.3. Механические свойства колец, раскатанных из высоких (первый способ) и низких (второй способ) заготовок

Материал	Способ изготовления	σ_B , МПа	σ_S , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ, МПа
ХН68ВМТЮК-ДВ	первый способ	1005	656	27,8	26,0	70	3250
	второй способ	1190	880	34,8	36	76	3270
ВТ9	первый способ	1050	-	12,0	20,0	37	3400
	второй способ	1210	-	14,0	25,8	60	3700

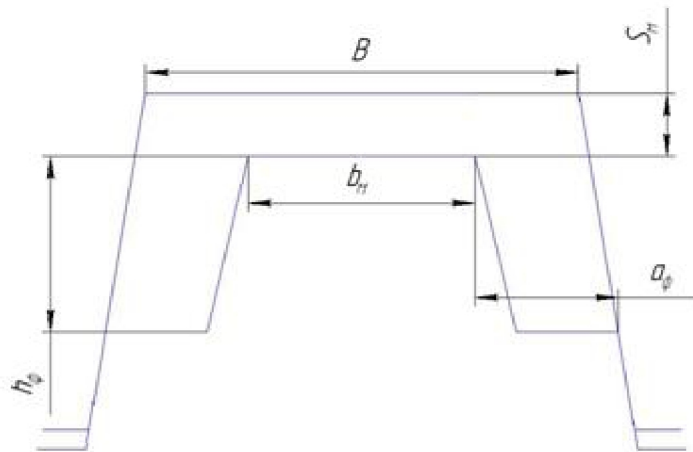


Рис. 4.3. Профиль швеллерного типа с открытыми фланцами

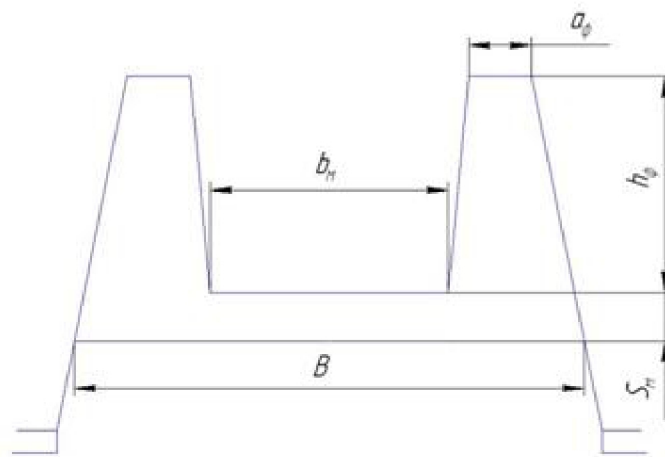


Рис. 4.4. Профиль швеллерного типа с закрытыми фланцами

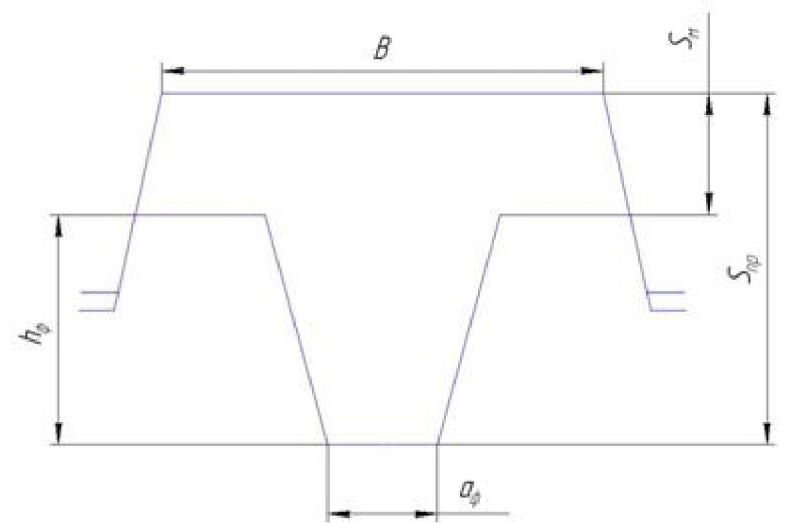


Рис. 4.5. Профиль таврового типа

4.3. Расчеты калибровок для колец авиационных двигателей швеллерного, балочного и таврового профилей

Основываясь на анализе номенклатуры кольцевых деталей авиационных двигателей, ее классификации, а также на известных методах калибровки прямолинейных профилей, используемых в продольной прокатке, были разработаны три основных метода калибрования колец: метод совместной раскатки со сверткой, метод балки и метод тавра, которые охватывают всю вышеупомянутую номенклатуру.

Метод балки предусматривает использование разрезного калибра, в котором осуществляется предварительное формирование профиля кольца, после чего осуществляется раскатка с обеспечением оптимальных условий калибровки.

Как показал опыт, метод балки наиболее эффективен для колец с толстыми высокими фланцами. Следовательно, по этому способу можно рассчитать третью группу кольцевых профилей авиационных двигателей. В данном случае необходимо установить геометрические соотношения параметров раскатных колец.

Исследованиями В.Н.Зиновьева [18] установлена возможность получения фланцевых профилей швеллерного типа, имеющих невысокие "толстые" фланцы, однокалиберной раскаткой. Отношение ширины фланцев к общей ширине профиля

$\frac{2a_\phi}{D}$ находится в диапазоне 0,22...0,64 при соотношении высоты фланца к его толщине

$$\frac{h_\phi}{a_\phi} = 0,55 \dots 1,25.$$

Как показал опыт и наши исследования, для выбранных типовых жаропрочных и титановых сплавов расчет калибровки валков по методу балки позволяет получать профили с открытыми фланцами

$$\frac{a_\phi}{B} = 0,25 \dots 0,75.$$

Этот метод позволяет выполнить профили с отношением высоты фланца к его толщине

$$\frac{h_\phi}{a_\phi} = 0,73 \dots 1,79.$$

Для деталей четвертой группы в данной работе разработан метод тавра. Он заключается в том, что в черновом калибре производится предварительное оформление тавра, а чистовой калибр обеспечивает получение окончательного профиля кольца. Калибровка валков по методу тавра в три перехода предусматривает получение следующих соотношений параметров профиля применительно к используемым сплавам (рис. 4.5):

$$\frac{h_\phi}{a_\phi} \leq 2,4; \frac{B}{a_\phi} \leq 5,6; \frac{S_0}{S_{np}} \geq 1,55, \quad (4.4)$$

где S_{i0} - высота профиля после раскатки в чистовом калибре.

При соотношениях, отличных от приведенных в (4.4), количество переходов увеличивается.

Во всех предлагаемых методах предусмотрен ящичный калибр, назначение которого состоит в сглаживании огранки и выведении разностенности в исходной заготовке.

Прежде чем перейти к описанию методик расчета калибровок, следует сразу отметить, что соотношения геометрических параметров калибров взяты с использованием известных работ Б.П.Бахтинова, Тафеля, Тринкса, А.П.Чекмарева, П.И.Полухина [69...72, 75]. Численные коэффициенты выбранных величин получены экспериментально.

4.3.1. Методика расчета калибровок кольцевых заготовок швеллерного типа по способу совместной раскатки со сверткой

Для раската колец швеллерного типа с тонкими высокими фланцами выбрана многокалиберная схема раскатки.

Первая операция раскатки кольца проводится в ящичном калибре. Эта операция характеризуется сглаживанием граней, выведением разностенности и овала при использовании ковальной заготовки, а также оформлением уклонов и радиусов на торцах и кромках заготовок, что при раскатке в последующих калибрах исключает образование заусенцев и обеспечивает получение заготовки высокой точности. Суммарная деформация за первый переход докритическая и составляет величину не более 5%. Данный переход соответствует первой стадии процесса раскатки.

Далее в закрытом разгонном калибре процесс формирования заданной геометрической фигуры производится одновременной раскаткой со сверткой. При этом прямоугольный обод принимает форму калибра. Этот переход соответствует второй стадии процесса раскатки.

В предчистовом калибре сверткой фигуры получается швеллерный профиль кольца. В этом калибре происходит незначительное перераспределение металла, вытяжки минимальны. За счет обеспечения условий стесненного изгиба в углах профиля, путем подпора металла, из ложных фланцев и утолщенных у основания действительных фланцев обеспечивается в предчистовом калибре хорошее заполнение углов профиля.

В чистовом калибре производится окончательное оформление профиля и получаются заданные диаметральные размеры кольца. Третий и четвертый переходы соответствуют третьей стадии процесса раскатки. Суммарные вытяжки во всех элементах профиля кольца равномерные.

Расчет калибровок для кольцевых профилей швеллерного типа, получаемых совместной раскаткой со сверткой, начинается с чистового калибра.

Чертеж чистового калибра закрытого типа (рис 4.6) путем наращивания припусков эквидистантно контуру чистового профиля, при этом выпуск наружных и внутренних стенок чистового калибра (δ_H, δ_{B1}) берется одинаковым и равным

3...5°. Радиус перехода шейки к фланцу R_f определяется по формуле

$$R_f = \frac{h_i}{t_i} + (3...4)_{мм},$$

где p_i – высота фланца;
 t_i – толщина фланца.

Профиль предчистового открытого калибра строится по чистовому калибру (рис. 4.7). Ширина предчистового калибра равна ширине чистового калибра $B_{II} = B_I$. Толщина фланцев, выпуск, ширина шейки, радиус перехода шейки к фланцу предчистового калибра также равны соответствующим величинам чистового калибра:

$$t_{II} = t_I, \delta_{III} = \delta_{III}, \delta_{VII} = \delta_{VI}, n_{II} = n_I, R_{II} = R_I.$$

Толщина шейки находится по формуле

$$S_{II} = \frac{S_I}{k_{oII}}, \tag{4.5}$$

где k_{oII} – коэффициент шейки, $k_{oII} = 0,70 \dots 0,75$.

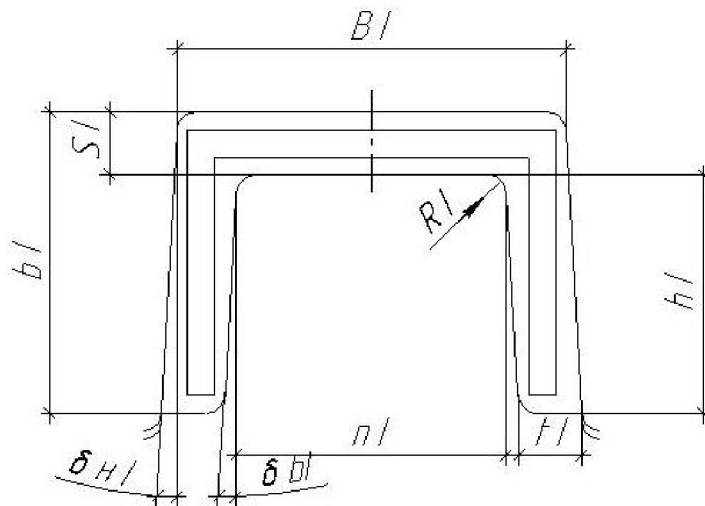


Рис. 4.6. Чистовой калибр

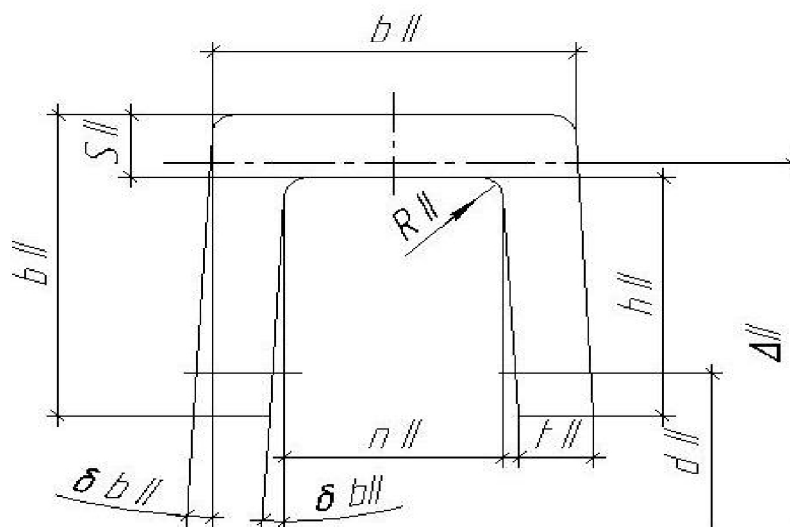


Рис. 4.7. Предчистовой калибр

Длина полков определяется по следующей формуле:

$$b_{II} = \frac{b_I}{k_{oII}}, \quad (4.6)$$

где k_{oII} - коэффициент фланца, $k_{oII} = 0,75 \dots 0,80$.

При свертке профиля в предчистовом калибре при коэффициенте свертки

$$k_{oII} = \frac{d_{II}}{D_{II}} \geq 0,5, \quad (4.7)$$

где d_{II}, D_{II} - внутренний и средний диаметры кольца, потери устойчивости фланца не наблюдается. Кроме того, необходимо провести проверочный расчет фланца на сжатие для внутренних фланцев или на растяжение - для наружных:

$$\varepsilon_c = \frac{b_{II}}{\frac{d_{II}}{2} + b_{II}} \leq [\varepsilon_c], \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_p = \frac{b_{II}}{\frac{D_{II}}{2} - \frac{S_{II}}{2}}. \quad (4.9)$$

Третий разгонный калибр рассчитывается следующим образом. Угол свертки калибра выбирается в пределах $\alpha = 25 \dots 500$. Длина дуги \cup VIII равна ширине предчистового калибра VII (рис. 4.8). Для лучшего заполнения профиля металлом предусмотрены ложные фланцы. Ширина ложных фланцев определяется из зависимости

$$a = t_I + (5 \dots 7) \text{ мм}, \quad (4.10)$$

высота ложных фланцев находится из соотношения

$$\frac{F_\varepsilon}{F_\Delta} = \frac{3}{1}, \quad (4.11)$$

где F_ε, F_Δ - площадь действительного и ложного фланцев.

Радиус кривизны шейки R'_1 равен R_1 .

Толщина шейки третьего калибра S_{III} находится по формуле

$$S_{III} = \frac{S_I}{k_{oIII}}, \quad (4.12)$$

где - $k_{oIII} = 0,75 \dots 0,80$.

Радиусы $R_{III}, R_{III}, R_{III}$ выбираются из соображения исключения закатов $R_{III} = 10 \dots 20$ мм, $R_{III} = 40 \dots 15$ мм, $R_{III} = 7 \dots 10$ мм.

Длина дуги \cup пIII равна ширине шейки первого калибра пI, толщина фланцев тIII находится по формуле $t_{III} = t_I - (0,5 \dots 1,0)$ мм.

Длина действительного фланца h (рис. 4.9) подсчитывается из условия равенства площадей фланцев второго и третьего калибров:

$$h = \frac{Z\sqrt{Z^2 - 4mn}}{2m}, \quad (4.13)$$

где параметры m и n определяются из соотношений

$$m = \frac{\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha}{2\operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\alpha}, n = \frac{a_I + h_{II}}{2} t_{II}. \quad (4.14)$$

Параметры z, β, α находятся построением (рис. 4.9).

В целях увеличения стойкости кромок валков разгонного калибра линия ab поворачивается в положение cd , площади f_1 и f_2 равны.

Расчет четвертого ящичного калибра (рис. 4.10) производится следующим образом. Ширина калибра B_{IV} определяется по формуле

$$B_{IV} = 2b_{II} + B_{II} - \Delta b,$$

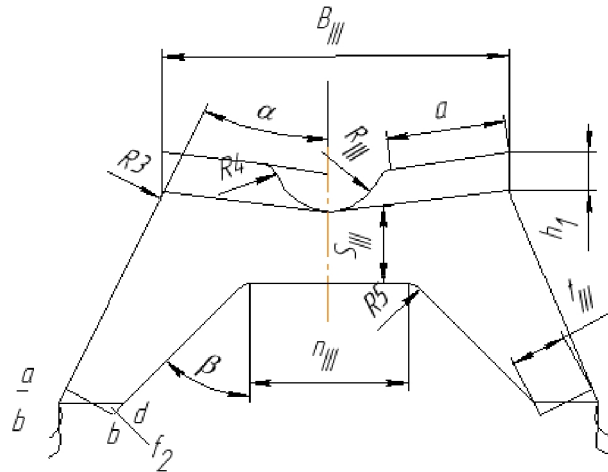


Рис 4.8. Калибр разгонный

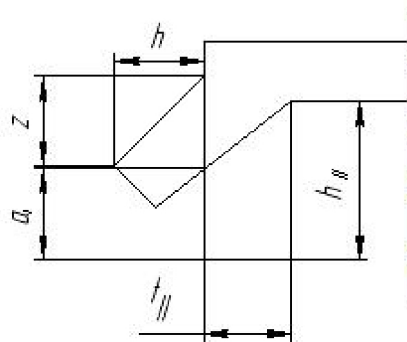


Рис. 4.9. Схема свертки профиля в предчистовом калибре

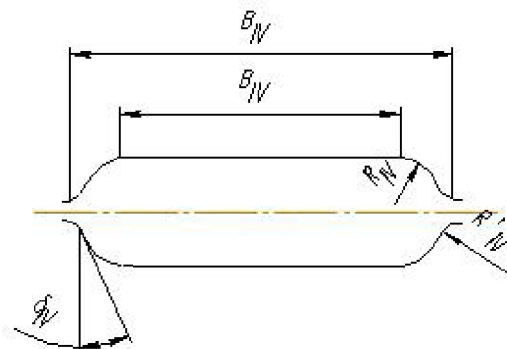


Рис. 4.10 Ящичный калибр

где Δb - уширение кольцевой полосы в разгонном калибре, которое определяется по следующей формуле: $\Delta b = 4\Delta h_{\text{нб}} \sin 2\alpha$, где $\Delta h_{\text{нб}}$ - толщина калиброванной заготовки S_{III} , рассчитывается из условия слияния зон пластической деформации с использованием зависимости (3.4):

$$S_{\text{III}} = \frac{s_i}{k_{\text{III}}},$$

где k_{III} - коэффициент, $k_{\text{III}} = 0,42 \dots 0,46$.

Радиусы ящичного калибра R_{III} и R'_{III} рассчитываются по формулам

$$R_{\text{IV}} = (0.06 \dots 0.065)B_{\text{IV}}; R'_{\text{IV}} = (0.03 \dots 0.035)B_{\text{IV}}$$

Подсчет исходной заготовки производится исходя из закона постоянства объема:

$$D_0 = \frac{V_{\varphi}}{\pi S_0 B_0} + S_0, \quad (4.15)$$

где D_0 - наружный диаметр исходной заготовки;

V_{φ} - объем исходной заготовки с учетом потерь на угар, зачистку и т.п.;

S_0 - толщина исходной кольцевой полосы;

B_0 - ширина исходной кольцевой полосы, $B_0 = b_4$.

В целях обеспечения центровки заготовки в калибре, а также стабилизации процесса свертки в разгонном и предчистовом калибрах необходимо предусматривать заходные конуса.

В качестве примера рассмотрим калибровку кольцевой заготовки проставки дисков компрессора высокого давления (рис. 4.11). На рис. 4.12 можно наблюдать типичную картину вытяжек по периметру профиля П для калибровки по методу совместной раскатки со сверткой.

Раскатка в ящичном калибре характеризуется малой вытяжкой $\mu = 1.05$, соответствующей докритической степени деформации. При раскатке в разгонном калибре металл деформируется по всему объему достаточно интенсивно ($\mu_{\text{шл}} = 1.75, \mu_{\text{фл}} = 2,0$), в местах набора сложных фланцев наблюдается снижение вытяжки до величины 1,2. В предчистовом калибре основная деформация происходит по зонам ложных фланцев, в шейке и во фланцах вытяжки минимальны. В чистовом калибре вытяжки по шейке несколько превышают вытяжки по фланцам ($\mu_{\text{шл}} = 1.75, \mu_{\text{фл}} = 2,0$). Это необходимо для наведения небольших растягивающих напряжений во фланцах в целях исключения гофрообразования. В целом же суммарные вытяжки по шейке и фланцам весьма близки ($\mu_{\text{шл}} = 2,5, \mu_{\text{фл}} = 2,2$), что говорит о несущественных напряжениях первого рода, имеющих место в раскатанной заготовке, которые при последующей высокотемпературной обработке полностью снимаются без отрицательного воздействия на геометрию кольца.

В итоге можно утверждать, что метод совместной раскатки со сверткой в сравнении с методом однокалиберной раскатки швеллерных профилей имеет ряд преимуществ:

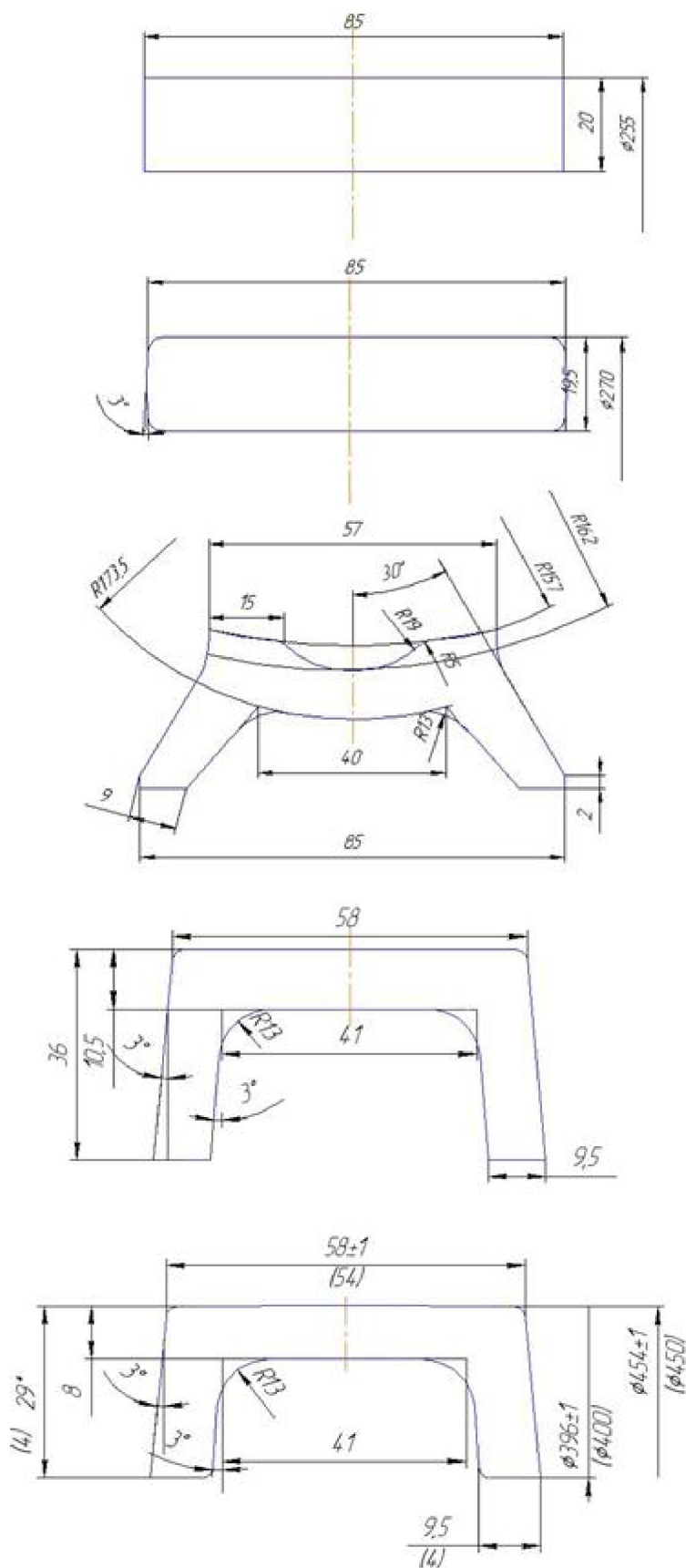


Рис. 4.11. Калибровка заготовки промежуточного кольца дисков из сплава ХН68ВМТЮК-ВД

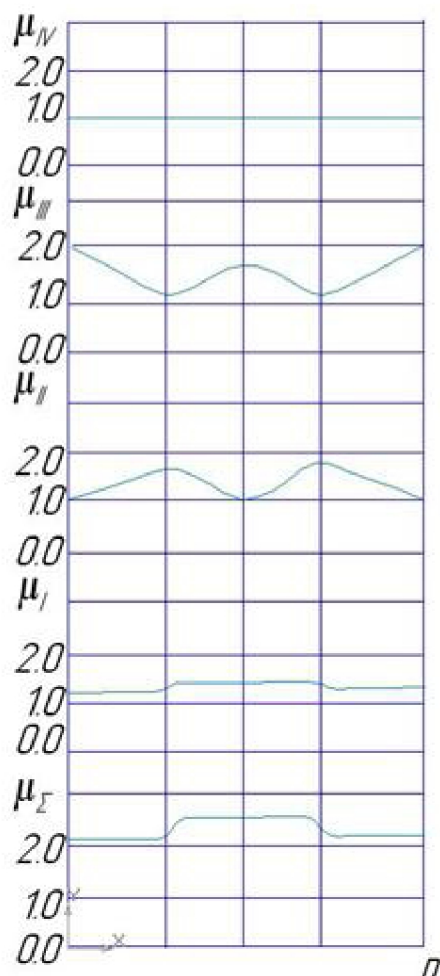


Рис. 4.12. Вытяжки по переходам калибровки заготовки проставки дисков из сплава ХН68ВМТЮК-ВД (рис. 4.11)

- обеспечивается получение колец с тонкими и высокими фланцами (отношение высоты фланца к его толщине может достигать пяти и более); обеспечивается получение колец весьма малого диаметра с большими фланцами;
- резко снижается трудоемкость и повышается коэффициент использования металла до 0,5 и выше; снижается усилие деформации; исключается появление заусенцев, получается хорошее заполнение и точный профиль; кольца получаются с высокой симметрией профиля, малой овальностью и торцевым короблением; обеспечивается равномерность деформации кольца как по толщине профиля, так и по диаметру, что позволяет получать однородную структуру и стабильно высокие механические свойства.

4.3.2. Методика расчета калибровок кольцевых заготовок балочного и швеллерного типа по способу балки

Особенность данной методики получения профилей швеллерного и балочного типа состоит в том, что их нельзя получить из прямоугольной заготовки, если применять более или менее равномерные обжатия, как, например, при раскатке по

способу совместной раскатки со сверткой. Однако резко неравномерная вытяжка по ширине профиля кольца в процессе раскатки швеллерных и балочных профилей осуществляется только в разрезанном калибре. При обеспечении температурных условий горячей деформации данная особенность не является существенной. В остальных калибрах используются равномерные вытяжки во всех элементах профиля. Это является обязательным условием для получения кольцевых профилей правильной формы без значительных внутренних напряжений при минимальном расходе энергии.

Вторым основным условием при расчете калибровки по данному методу является обеспечение боковых обжатий во фланцевых элементах профиля с целью не только утонения последних, но и предотвращения их утяжки.

Расчет калибровки производится, начиная с чистового (рис. 4.13).

Радиусы перехода шейки к фланцам выбираются из условия образования зажимов $R_{шл} = 0.4h_{фл}$, r_I - выбирается равным номинальному припуску под механическую обработку чистового калибра, берется равным $3...5^\circ$. После построения чистового калибра производится расчет разрезного калибра (рис. 4.14). Ширина разрезного калибра B_{II} равна ширине чистового калибра B_I , за вычетом уширения Δb , которое определяется из соотношения

$$\Delta b = (0.01...0.025)B_I. \quad (4.16)$$

Высота действительного фланца разрезного калибра для закрытых фланцев $h_{IIз}$ выбирается из соотношения

$$h_{IIз} = h_I + \Delta h_y - \Delta h_0, \quad (4.17)$$

где Δh_y - утяжка фланцев;

Δh_0 - удлинение фланцев за счет бокового обжатия,

$$\Delta h_0 = 0.1\Delta h_{II}.$$

Для открытых фланцев высота действительных фланцев определяется из соотношения (4.20), где

$$\Delta h_y = 0.25\Delta h_{II}, \Delta h_0 = 0.15\Delta h_{II}. \quad (4.18)$$

Ширина шейки разрезного калибра $b_{шII}$ выбирается равной $15...40$ мм соответственно ширине профиля. Толщина фланца у основания рассчитывается по формуле

$$b_{шII} = 0.5(B_{II} - n_{II}), \quad (4.19)$$

у вершины рассчитывается по формуле

$$a_{II} = k_{II}b_{шII}, \quad (4.20)$$

где k_{II} - коэффициент, равный $0,4...0,5$.

Между высотой фланца и разностью толщин фланца у основания и вершины существует отношение, равное

$$\frac{h_{II}}{b_{шII} - a_{II}} = 2.0...2.6. \quad (4.21)$$

Толщину шейки разрезного калибра следует определять, приняв вытяжки по шейке

$$\eta_{oII} = \frac{S_{oII}}{S_{oI}} = 1.25 \dots 1.40, \quad (4.22)$$

где S_{oI} - толщина шейки чистового калибра;
 S_{oII} - толщина шейки разрезного калибра.

Для разрезных калибров угол φ выбирается в пределах $45 \dots 60^\circ$. Чем больше угол разрезного гребня φ , тем труднее получить высокие фланцы профиля из-за значительной утяжки фланцев. Малые углы также использовать не следует из-за значительной деформации гребня при раскатке.

Необходимым условием при проектировании калибровки также является то, что фланцы разрезного профиля должны беспрепятственно входить в чистовой калибр на глубину $1/2 \dots 2/3$ закрытых фланцев и на $1/3 \dots 1/2$ - для открытых фланцев.

Вытяжки по фланцам при раскатке черного профиля в чистовом калибре должны быть $h_{o\bar{e}} = 1.35 \dots 1.70$.

Выпуск для закрытых фланцев принимают равным $2 \dots 3^\circ$, для открытых $3 \dots 5^\circ$.

Радиусы закругления в черновом калибре принимают равными

$$R_{II} = (2.2 \dots 3.0)a_{II}, r_{II} = (1.0 \dots 1.7)a_{II} \quad (4.26)$$

Во избежание образования по месту разъема валков необходимо производить раскатку кольца предварительно в прогладочном ящичном калибре с оформлением радиусов на кромках, по величине достаточных для компенсации последующего уширения при раскатке в разрезном и чистовом калибрах. Форма и размер ящичного калибра должны соответствовать рис. 4.15, где

$$R_{III} = 0.175B_{III}, r_{III} = (0.07 \dots 0.075)B_{III}. \quad (4.23)$$

Выпуск δ_{III} соответствует углу $2 \dots 5^\circ$. Толщина заготовки после раскатки в ящичном калибре выбирается на $20 \dots 30\%$ больше высоты черного профиля S_{II} .

Ширина профиля B_{III} равна ширине черного профиля B_{II} .

Толщина исходной заготовки S_0 выбирается равной

$$S_0 = (1.04 \dots 1.05)S_{III}. \quad (4.24)$$

Ширина исходной заготовки B_0 принимается равной ширине профиля после прогладки B_{III} .

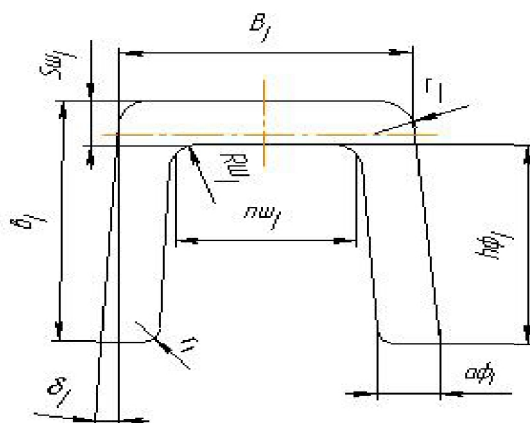


Рис. 4.13 Калибр чистовой

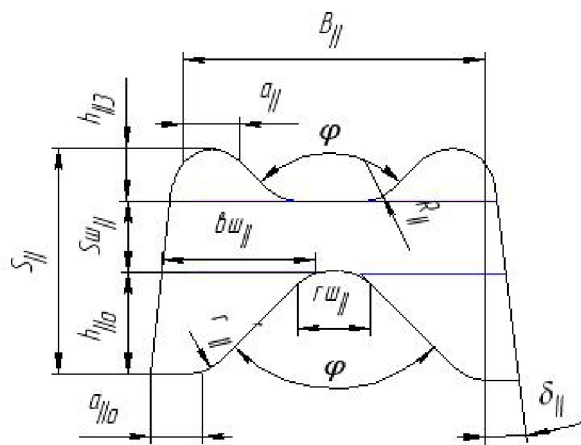


Рис. 4.14 Разрезной калибр

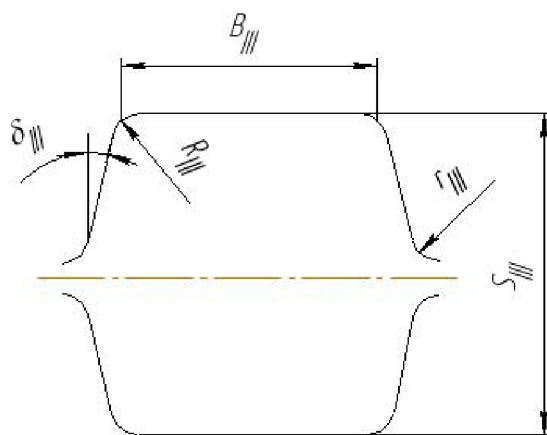


Рис. 4.15 Ящичный калибр

При расчете профилей швеллерного типа расчет ведется аналогично методу балки с учетом особенностей заполнения открытых и закрытых фланцев.

В целях лучшего заполнения фланцев предусматривают в черновом профиле ложные фланцы. Площадь ложных фланцев определяют из соотношения

$$\frac{F_a}{F_a + F_e} = 0,4...0,5, \quad (4.25)$$

где F_e, F_a - соответственно площади ложных и действительных фланцев.

В разрезном калибре толщину ложных и действительных фланцев у основания принимают одинаковой. Толщина ложных фланцев у вершин находится из соотношения

$$a_e = (7.7...0.8)b_e. \quad (4.26)$$

Высота ложных фланцев находится из соотношения

$$h_e = \frac{F_e}{a_e + b_e}. \quad (4.27)$$

В качестве примера рассмотрим калибровку кольцевой заготовки промежуточного кольца компрессора среднего давления (рис. 4.16, 4.17). Это типовая калибровка швеллерного кольца по методу балки. Раскатка в ящичном

калибре имеет незначительную вытяжку $\mu = 1,05$, что соответствует докритической деформации для сплава ВТ20.

Разрезной калибр имеет существенную разницу вытяжек по шейке и фланцам $\mu_{ш} = 6.5, \mu_{\delta} = 1.25$, но так как формоизменение происходит при температуре горячей деформации, интенсивной деформации подвергается незначительный объем профиля заготовки, напряженное состояние имеет картину всестороннего сжатия, то нарушение сплошности металла заготовки не происходит.

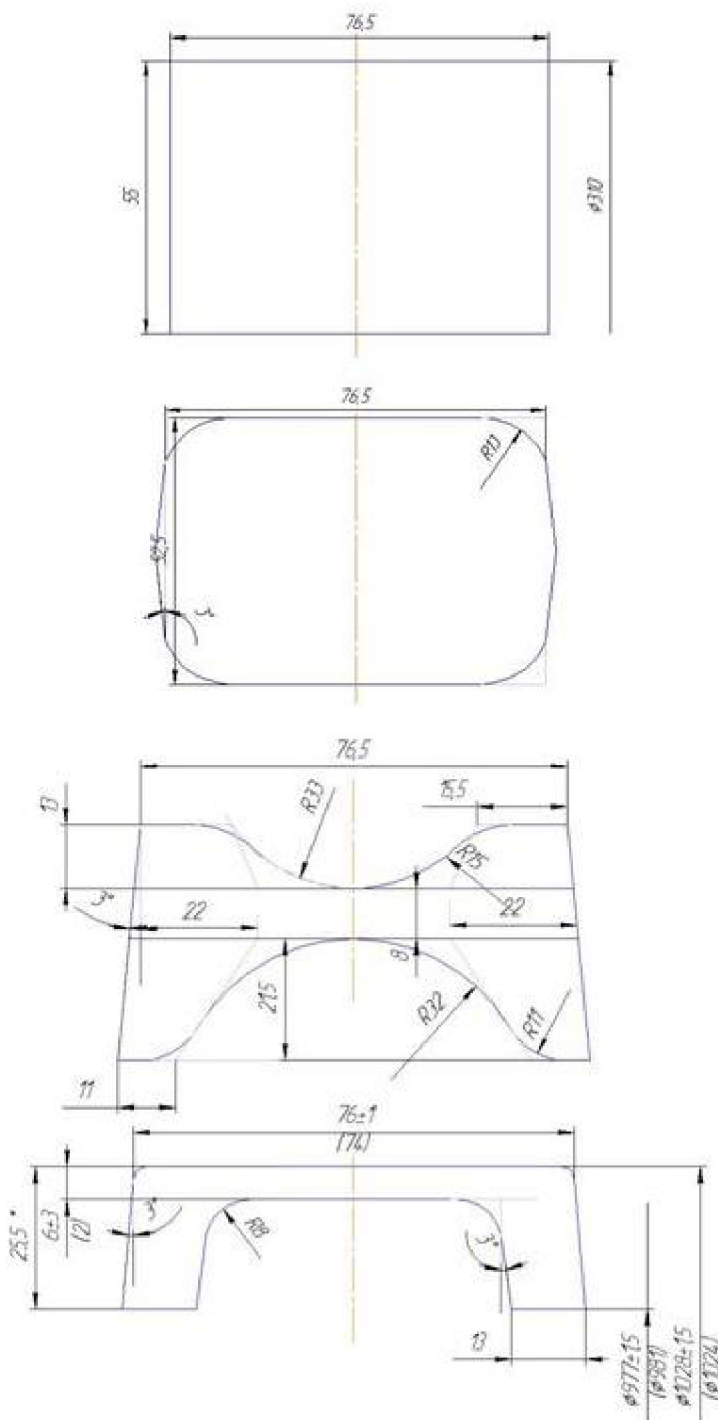


Рис. 4.16. Калибровка заготовок промежуточного кольца компрессора из сплава ВТ20

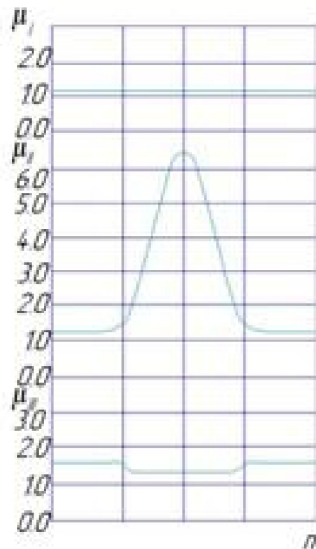


Рис. 4.17. Вытяжки по переходам калибровки промежуточного кольца из сплава ВТ20

Процесс интенсивной раскатки в чистовом калибре предусматривает достаточно близкие вытяжки в элементах профиля ($\mu_{III} = 1.35, \mu_{\delta} = 1.65$), что обеспечивает получение мелкозернистой структуры, равномерной по всему объему кольца.

4.3.3. Методика расчета калибровок кольцевых заготовок по способу тавра

По своему внешнему виду тавровый профиль похож на балочный, поэтому способы их калибрования имеют много общего. Так, например, формоизменение фланцев происходит за счет боковых обжатий в закрытых фланцах калибров.

Типовая схема калибровки по методу тавра предусматривает получение профилей как по методу балки, в трех калибрах: ящичном, черновом и чистовом.

Расчет калибровки, как и в двух предыдущих способах, производится, начиная с чистового калибра (рис. 4.18). Радиусы перехода полок к фланцу выбираются из условия исключения зажимов $R_1 = 0.4h_{фл}, r_1$ - выбирается равным номинальному припуску на механическую обработку. Выпуск чистового калибра берется равным $3...5^\circ$. После построения чистового калибра рассчитывается черновой калибр (рис. 4.19). Высота фланца в чистовом калибре рассчитывается, как для закрытых фланцев по методу балки:

$$h_{эл} = h_1 + \Delta h_y - \Delta h_0,$$

$$\text{где } \Delta h_y = 0.5\Delta h_{II}, \Delta h_0 = 0.1h_{II}.$$

(4.28)

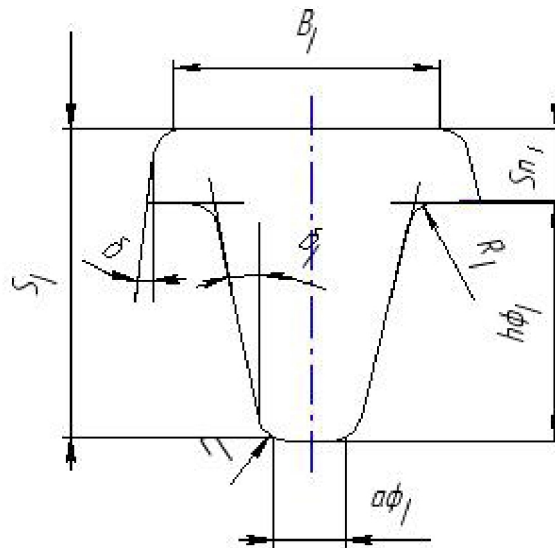


Рис. 4.18. Калибр чистовой

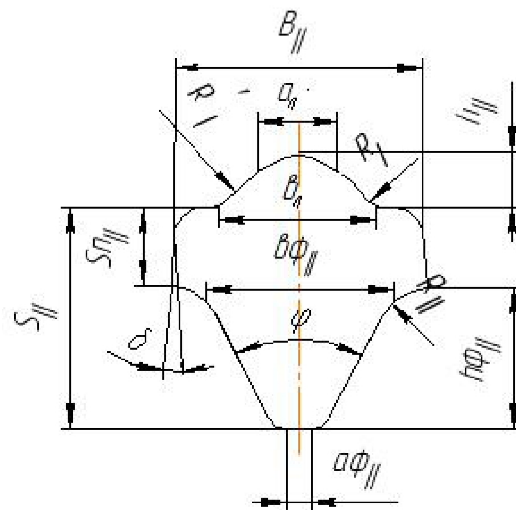


Рис. 4.19. Черновой калибр

Параметры a_{oII} , b_{oII} , φ , R_e выбираются из условия свободного вхождения фланца чернового профиля в чистовой калибр на величину не менее $2/3$ высоты чистого фланца. Следует учесть, что угол φ выбирается в пределах $30...55^\circ$. При выборе угла меньше указанного интервала заполнение фланца значительно ухудшается. Толщина полотна S_{nII} выбирается из соотношения

$$S_{nII} = (1.25...1.3)S_{nI} \quad (4.29)$$

где S_{nI} - толщина полотна чистового профиля.

Для улучшения заполнения чистового профиля в черновом калибре предусмотрен ложный фланец, параметры которого выбираются из условия

$$\begin{aligned} \frac{F}{F + F_n} &= 0.15...0.20, \\ a_n &= (0.27...0.32)a_{\phi II}, \\ b_n = b_{np}, h &= \frac{2F_n}{a_n + b_n}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Ширина предварительного профиля ВП выбирается из соотношения

$$\hat{A}_{II} = \hat{A}_1 - \Delta b, \quad (4.31)$$

где Δb - уширение профиля в чистовом калибре.

$$\Delta b = 0.25B_1. \quad (4.32)$$

Радиусы $R1$ и R'_1 выбираются построением после определения параметров калибров $h1$ и $a1$.

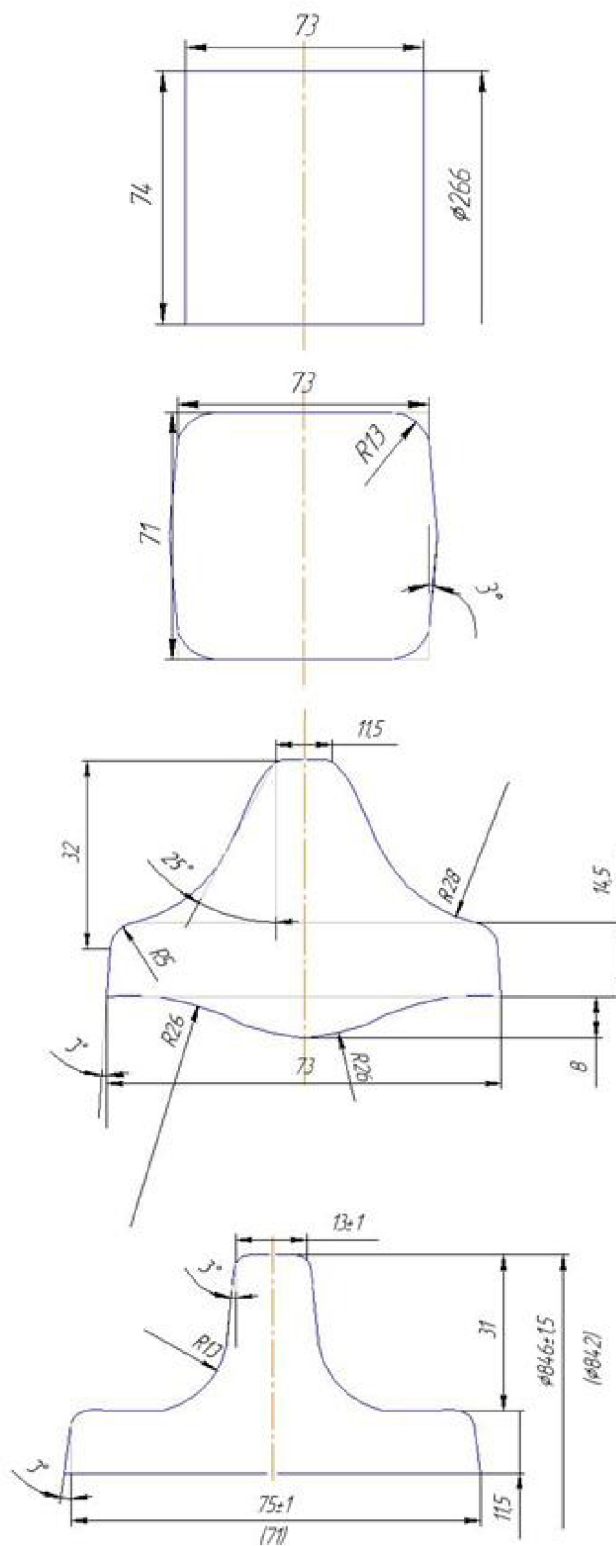


Рис. 4.20. Калибровка заготовки кольца компрессора из сплава ХН45МВТЮБР-ИД

Радиус сопряжения фланца с полкой R_{II} рассчитывается из соотношения $R_{II} = (2.2...2.5)$. (4.33)

Размеры ящичного калибра и исходной заготовки выбираются с использованием соотношений, приведенных в методике расчета балочных профилей.

Для примера рассмотрим калибровку кольцевой заготовки кольца компрессора высокого давления (рис. 4.20). Это типовая калибровка по методу тавра. Механизм формоизменения заготовки аналогичен методу балки (рис. 4.21).

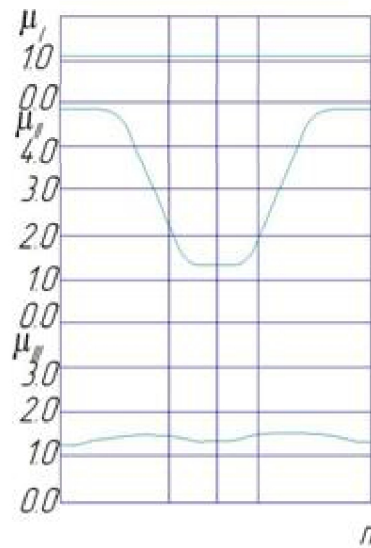


Рис. 4.21. Вытяжки по переходам калибровки заготовки кольца из сплава ХН45МВТЮБР-ИД

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, Н.Д. Обеспечение надежности двигателей для гражданской авиации / Н.Д.Кузнецов // Основные вопросы теории и практики надежности. – М.: Советское радио, 1975.– С. 27–42.
2. Елизаветин, М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А.Елизаветин, Э.А.Сатель.–М.: Машиностроение, 1969.–400с.
3. Надежность и долговечность машин / [Б.И.Костецкий и др.]//–Киев: Техника, 1975.–406с.
4. Михайлов, К.Н. Основные задачи науки и промышленности в развитии процессов раскатки / К.Н.Михайлов, М.С.Сиротинский // Научно-технический бюллетень ВИЛС: Технология легких сплавов. 1973. –№11. –С. 9–10.
5. Пуппе, И. Справочник по металлургии. Прокатное дело / И.Пуппе, Г.Штаубер – Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1934. Т. 1–402 с.
6. Изготовление сварных кольцевых заготовок из листовых материалов / [В.Л.Арутюнов и др.]–М.: НИАТ, 1980. –160с.
7. Тришевский, И.С. Гнутые профили проката / И.С.Тришевский –М.: Металлургия, 1980. – 352 с.
8. Алексеев, Ю.Н. Исследование состояния при ротационном выдавливании биметаллических оболочек /Ю.Н.Алексеев // Самолетостроение техн. воздушн. флота: респ. межвед. тематич. науч.техн.сб. 1976. –№39. – С. 57–62.
9. Баркая, В.Ф. К теории расчета усилий и точности процессов ротационного формообразования / В.Ф.Баркая // Тр. Грузин. политехн. ин-та.–1975.–№1.–С. 173–177.
10. Шепелев, И.Н. Изготовление кольцевых заготовок из листовых штамповых и жаропрочных сплавов на давилной установке с нагревом зоны деформации / И.Н.Шепелев, Г.Н.Проскуряков // Авиационная промышленность. 1975.–№3. – С. 60–63.
11. Исследование силовых параметров процесса ротационного выдавливания / [К.Н.Богоявленский и др.]// Научные основы автоматизированных производственных процессов в машиностроении и приборостроении: тез. докл. 4-й Всесоюз. межвуз. конф. 1975. Секция: Обработка металлов давлением. –М., 1974.–С. 35–37.
12. Проскуряков, Г.В. Стесненный изгиб / Г.В.Проскуряков // Авиационная промышленность.–1966.–№2.–С. 9–13.
13. Ершов, В.И. К расчету процессов формоизменения под действием нескольких нагрузок / В.И.Ершов // Авиационная техника.–1980.–№2.–С. 103–107.
14. Найденов, М.П. Основы расчета силовых параметров тангенциальной обработки трубчатых заготовок с применением теории размерностей / М.П.Найденов // Обработка металлов давлением в машиностроении. –1974.–№12. –С. 8–16.
15. Назарцев, Н.И. Разработка технологии изготовления бесшовных цилиндрических тонкостенных обечаек методом раскатки / Н.И.Назарцев, Б.В.Свитов // Стали и сплавы цветных металлов.–Куйбышев.–1974.–С. 84–92.
16. Ершов, В.И. Анализ двух способов локального деформирования / В.И.Ершов // Авиационная техника.–1981.–№1.–С. 87–92.
17. Анализ схем формообразования толстолистовых профилей стесненным изгибом / [А.С.Зажигин и др.]// Авиационная промышленность.– 1968. – №5. – С. 9– 11.

18. Зиновьев, В.Н. Исследование и совершенствование процесса раскатки колец из сплавов титана: автореф. дис... канд.техн.наук / В.Н.Зиновьев –М., 1977. –16 с.
19. Горячая раскатка профильных кольцевых деталей /Г.И.Зуев, А.И.Мурзов, В.А.Костышев [и др.]// Аллюминиевые сплавы и специальные материалы: тр. ВИАМ.– 1975.– №9.– С. 157–162.
20. Прокатка титановых бесшовных сложнопрофильных колец /А.И.Мурзов, В.А.Костышев, Г.И.Зуев [и др.]// Аллюминиевые сплавы и специальные материалы: тр. ВИАМ.– 1977.– №10.– С. 155–160.
21. Производство бесшовных колец П-образной формы из жаропрочных сплавов по новой схеме раскатки /А.И.Мурзов, Г.И.Зуев, В.А.Костышев [и др.]// Аллюминиевые сплавы и специальные материалы: тр. ВИАМ.–1977.–№10.–С. 160–165.
22. Опыт изготовления раскатных колец сложной конфигурации на машине РМ500 /[А.Я.Хозенюк и др.]// Научно-технический бюллетень ВИЛС: Технология легких сплавов.–1973.–№11.–С. 76–79.
23. Jagishita K. et al. - "Mitsubishi jukogijho", 1975, 12, №2, pp. 206-215.
24. Методы получения однородной макроструктуры и стабильных механических свойств цельнокатанных колец из титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1/[Л.Н.Иванкина и др.]// Технология легких сплавов.– 1973.– №2.– С. 50–56.
25. Зиновьев, В.Н. Возможности прокатки на стане КПС- 2000 титановых колец с высокими механическими свойствами / В.Н.Зиновьев, Л.Н.Иванкина // Производство титановых сплавов. ВИЛС.– 1975.– №7.– С. 283–288.
26. Исследование процесса прокатки колец с помощью кино съемки /[В.Я.Осадчий и др.]// Технология легких сплавов.– 1976.– №5.– С. 40–43.
27. Производство полуфабрикатов методом кольцевой прокатки. Исследования, технология, оборудование /[В.Н.Зиновьев и др.]// Технология легких сплавов.– 1977.– №8.– С. 79–88.
28. Остроушкин, Г.П. Особенности пластического напряженного состояния при раскатке колец / Г.П.Остроушкин // Кузнечно-штамповочное производство.–1973.– №4.–С. 5–8.
29. Получение кольцевых заготовок прямоугольного и профильного сечения из сплава АМг6 методом раскатки /[А.И.Мурзов и др.]// Технология легких сплавов.– 1967.–№6.–С. 56–60.
30. Прокатка колец прямоугольного профильного сечения из сплава АМг6 /[А.И.Мурзов и др.]// Аллюминиевые и специальные сплавы.–1967.–№3.–С. 120–124.
31. Соловцев, С.С. Формоизменение кольцевых заготовок при горячей раскатке с тавровым профилем поперечного сечения / С.С.Соловцев, М.Я.Альшиц // Кузнечно-штамповочное производство.–1970.–№2.–С. 1–4.
32. Рабинович, Л.А. Изготовление бесшовных кольцевых заготовок машинной раскаткой / Л.А.Рабинович // Производственно-технический бюллетень.– 1971.– №10.– С. 6–9.
33. Лапин, В.В. Кинематические соотношения при раскатке колец прямоугольного сечения / В.В.Лапин // Тр. Ленинград. политехн. ин-та.–1970.–№315.– С. 105–109.
34. Богоявленский, К.Н. Холодная раскатка кольцевых деталей / К.Н.Богоявленский, В.В.Лапин // Кузнечно-штамповочное производство.– 1973.– №2.– С. 18–22.

35. Давыдов, Ю.Д. Проектирование чертежа поковки раскатного кольца с помощью ЭВМ / Ю.Д.Давыдов // Кузнечно-штамповочное производство.– 1969.– №11.– С. 9–11.
36. Vieregge Gustav Gestaltung einer Riugschmiede under besonderer Berucksichtigung des Rmgwalzverfahrens. Stahl imd Eisen, 1971, 91. №10, pp. 563-572.
37. Казанцев, В.П. Штамповка точной заготовки для прокатки колец / В.П.Казанцев, В.В.Новичев // Технология легких сплавов.– 1975.– №12.– С. 80–81.
38. Образование утяжки при прокатке фасонных колец. "Int. J.Mech. Sei." 1975, 17, №11-12, с. 669-672. РЖ 14В, 1976, 6В64.
39. Влияние соотношения диаметров валков на основные параметры процесса раскатки колец / [П.И.Полухин и др.]// Изв. вузов. Черная металлургия.– 1972.– №7.– С. 80–82.
40. Полухин, П.И. Распределение удельного давления по длине очага деформации при прокатке колец / П.И.Полухин // Изв. вузов. Черная металлургия.– 1970.– №11.– С. 77–80.
41. Сидоренко, Б.Ф. Технологические особенности изготовления кольцевых деталей раскаткой / Б.Н.Сидоренко, Б.Ф.Савченко // Технология и организация производства.– 1973.– №3.– С. 38–41.
42. Шевченко, Л.Н. Получение кольцевых заготовок из сплава Д16 методом радиальной раскатки / Л.Н.Швеченко, А.Г.Дорошевич // Производственно-технический бюллетень.–1975.–№6.–С. 24–25.
43. Давление на валки и крутящий момент при раскатке колец. – "Int. J.Mech. Sei" 1973, 11, 15, №11, с. 873–893.
44. Прокатка колец на заводе фирмы Woodhouse and Rixson. - Ring rolling at Woodhouse and Rixson. "Met and Metal Form.," 1973, 40, №8, с. 233. Реф.: РЖ Металлургия, 1974, 2Д79.
45. Исследование механизма деформирования, схемы напряженного состояния и выбор оптимальных решений при раскатке колец / [А.И.Мурзов и др.]// Информационно-технический бюллетень. –Куйбышев. – 1977. – №6. – С. 5.
46. Юшков, А.В. Определение усилий при операциях изготовления колец свободной ковкой / А.В.Юшков, А.И.Мурзов, В.А.Костышев // Информационно-технический бюллетень. –Куйбышев. –1979. –№12. –С. 5–8.
47. Мурзов, А.И. Исследование напряженно-деформированного состояния при раскатке колец ГТД: межвуз. сб. / А.И.Мурзов, В.А.Костышев, Г.И.Зуев –Куйбышев. – 1979. – С. 3–9.
48. Костышев, В.А. Напряженное состояние в очаге деформации при раскатке колец- авиационных двигателей с учетом теории анизотропных сред: сб. СГАУ / В.А.Костышев – Самара, 1997. – С. 57–63.
49. Weber K.H. - "Stahl und Eisen", 1959, Bd 79, Nr. 26, pp. 1912-1923.
50. Node T., lamato H. - "Sumitomo Metals", 1976, a: 28, №1, pp. 87-93.
51. Котельникова, Л.П. Производство точных заготовок машиностроительных деталей прокаткой / Л.П.Котельникова, Г.Г.Шалинов –М.: ВНИИНФОРМТЯЖМАШ, 1968. – С. 155–203.
52. Johnson W., Hawkuard J.B. – "Metallurgia und Metal Forming", 1976, v. 43, №1, pp. 4–11. (ЭИ.ТОКП, №19, 1976.)
53. Marczinski HJ. - "Metallurgia und Metal Forming", 1976, v. 43, №6, pp. 171–177.

54. Moderne Ringproduktion auf Banning HV - Rmgwalzmaschinen. Vortrag. Scirmedeausrustungskongress "Forming Equipment Symposium", US -Forging Industry Association. Chicago. 1973, pp. 104-108.
55. Лапин, В.В. Исследование формоизменения при раскатке колец прямоугольного сечения / В.В.Лапин, А.Ф.Фомичев // Тр. Ленинград. политехн. ин-та. 1969. –№308. –С. 144–148.
56. Winship J.T. Cold ring-rolling warms up Amer. Mach., 1976, 20, № I, pp. 110-113 (ЭИ. ТОКП, №20, 1976.)
57. Neuveau lammoir automatique a anneaux. "Metaux deform." 1979, № 52, pp. 31-36 (ЭИ. ТОКП, №9, 1980.)
58. Hawkyaid J.B., Ingham P.M. An investigation into profile ring rolling. "Proc. 1st. Int. Conf. Rotary Metahvork. Process., London, 1979." Kempston, 1979, pp. 309, 311-320 (ЭИ. ТОКП, №40, 1980.)
59. Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы / Ф.Ф.Химушин –М.: Металлургия, 1969. –752 с.
60. Раскатка полых заготовок, полученных путем вытягивания из расплава с последующим вакуумным дуговым переплавом /[В.А.Калицев и др.]// Технология легких сплавов. –1973. –№11. –С. 72–76.
61. Перспективные процессы металлургии жаропрочных сплавов /[Р.Е.Шалин и др.]// Авиационные материалы. –1977. –№1. –С. 56–68.
62. Производство полых слитков ВДИ. Усовершенствование в процессах ЭШП, ВДП и ВИЛ /[В.А.Калицев и др.] –М.: Черметинформация, 1978.
63. Калицев, В.А. Разработка и исследование процесса получения полых слитков из жаропрочных сплавов методом вакуумного дугового переплава: автореф. дис... канд.техн.наук.–М., 1978. –26 с.
64. Павлов, И.М. Теория прокатки /И.М.Павлов –М.: Металлургиздат, 1950. – 610 с.
65. Головин, А.Ф. Прокатка / А.Ф.Головин –М.: ОНТИ, 1933. Ч. 1. –222с.
66. Грум-Гржимайло, В.Е. Прокатка и калибровка / В.Е.Грум-Гржимайло –М.: КУБУЧ, 1933. –127с.
67. Виноградов, А.П. Калибровка прокатных валков / А.П.Виноградов –М.: ОНТИ, 1933. –310с.
68. Бахтинов, Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П.Бахтинов, М.М. Штернов –М.: Металлургиздат, 1953. –784 с.
69. Тафель. Прокатка и калибровка. –М.: Гостехиздат, 1931. –303 с.
70. Тринкс. Калибровка прокатных валков. –М.: ОНТИ7, 1934. –230 с.
71. Чекмарев, А.П. Метод калибровки блюминга / А.П.Чекмарев –М.: Домез, 1932. –№3. –С. 7–9.
72. Шадрин, В.А. Исследование коэффициентов деформации полосы при прокатке в сложных калибрах / В.А.Шадрин // Уральская металлургия. –1935. –№10. –С. 5–8.
73. Теория обработки металлов давлением /[И.Я.Тарновский и др.]–М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
74. Прокатное производство /[П.И.Полухин и др.] – М.: Металлургия, 1969. – 676 с.
75. Кирхберг, Э. Калибровка прокатных валков / Э.Кирхберг –М.: Домез, 1929.

№1; 2. –С. 28–31; 42–46.

76. Мурзов, А.И. К вопросу о проблеме деформации металла, находящегося в зоне валков / А.И.Мурзов // *Алюминиевые сплавы и специальные материалы*. –1977. – №10. – С. 134–143.

77. Мурзов, А.И. Высотное распространение пластической деформации в слитках из алюминиевых сплавов при прокатке / А.И.Мурзов, Ю.В.Гусев, Ю.Н.Курсиков // *Алюминиевые сплавы и специальные материалы*. – 1977. – №10. – С. 129–133.

78. Целиков, А.И. Основы теории прокатки / А.И.Целиков –М.: Металлургиздат, 1965. –247 с.

79. Hawkyard J.V. at al. - "1, of mechanical sciense", 1973, v. 15, №11, pp. 873–893.

80. Дурнев, В.Д. Теория образования текстур в металлах и сплавах / В.Д.Дурнев, В.С.Смирнов –М.: Наука, 1979. –343 с.

81. Смирнов, В.С. Текстуобразование металлов при прокатке. / В.С.Смирнов, В.Д.Дурнев –М.: Металлургия, 1971. –254 с.

82. Шевелев, В.В. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку / В.В.Шевелев, С.П.Яковлев –М.: Машиностроение, 1972. –134 с.

83. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров /У.Джонсон, Т.Меллор// – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.

84. Brammer J.S., Thomson T.R., Hobbs R.M., Sheet Steels for formiiii'. applications. 1. Austrab Just. Metals, 1972, 17, №3, pp. 147–157.

85. Бабарако, А.А. Текстуры металлов и сплавов / А.А.Бабарако – М.: ВИНТИ АН СССР, 1980.

86. Арышенский, Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов / Ю.М.Арышенский –Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. –112 с.

87. Арышенский, Ю.М. Связь между коэффициентами конечной деформации ортотропных тел в упругой и пластической областях / Ю.М.Арышенский, И.И.Калужский // Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. –Тула, 1978. – С. 146–149.

88. Уваров, В.В. О возможностях регулирования анизотропии листовых материалов / В.В.Уваров, Ю.М.Арышенский // Теория и технология обработки металлов давлением. –Куйбышев, 1977. –С. 17–21.

89. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В.Сторожев, Е.А.Попов –М.: Машиностроение, 1971. – 424с.

90. Чекмарев, А.П. Теория продольной прокатки / А.П.Чекмарев, А.Н.Нефедов, В.А.Николаев –Харьков: Книжное издательство, 1965. – 212 с.

91. Тарновский, И.Я. Формоизменение при пластической обработке давлением / И.Я.Тарнавский – М.: Металлургиздат, 1954. – 535 с.

92. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов / С.И.Губкин – М.: Металлургиздат, 1960. Т. 1. – 376 с; 1960. Т. 2. – 416 с; 1960. Т. 3. –306 с.

93. Корнеев, Н.И. Пластическая деформация металлов и термический режим обработки давлением сталей и сплавов / Н.И.Корнеев –М.: Машгиз, 1949. –52 с.

94. Корнеев, Н.И. Пластическая деформация высоколегированных сплавов / Н.И.Корнеев, И.Г.Скугарев – Оборонгиз, 1955. – 245 с.

95. Hollenberg A., Bemerkunden zu den Vorgangen beim Walzen von Eisens, St. u. E., 1883, №2, pp. 121–122.

96. Павлов, И.М. Прокатка, волочение и выдавливание металлов в связи с

- теорией образования трещин / И.М.Павлов // ЖРМО. – 1927. – №1. – С. 253–313.
97. Соболевский, Н.А. Основные явления процесса прокатки / Н.А.Соболевский // Советская металлургия. – 1933. – №9. – С. 91–94.
98. Голубев, Т.М. Распределение горизонтальных скоростей в очаге деформации при прокатке / Т.М.Голубев // Тр. Сибир. металлург. ин-та им. С.Орджоникидзе. Исследование процессов обработки металлов давлением. –Металлургиздат, 1954. – №1. – С. 261–276.
99. Коллашников, А.И. Течение металла при прокатке алюминия / А.И.Коллашников // Материалы по теории прокатки. –1960. –№5. –С. 286–293.
- 100.Чекмарев, А.П. Уширение при прокатке широких и узких полос / А.П.Чекмарев // Материалы по теории прокатки. – 1958. – С. 382–401.
- 101.Смирнов, В.С. Теория обработки металлов давлением / В.С.Смирнов –М.: Металлургия, 1973. –496 с.
- 102.Irinks W., The Biasi Furnace and Steel Plant, 1915. 220 p.
- 103.Тарновский, И.Я. Деформация металла при прокатке / И.Я.Тарновский, Л.А.Поздеев, В.Б.Ляшков –М.: Металлургиздат, 1956. –287с.
- 104.Колмогоров, В.Л. Пластичность и разрушение / В.Л.Колмогоров –М.: Металлургия, 1977. – 336 с.
- 105.Теория прокатки/под ред. А.П.Чекмарева –М.: Металлургиздат, 1962. – 739 с.
- 106.Музалевский, О.Т. Распределение скорости деформации в зоне обжатия при прокатке. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением / О.Т.Музалевский –М.: Металлургиздат, 1964. –С. 228–234.
- 107.Лахтин, Ю.М. Металловедение / Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева –М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
- 108.Томленов, А.Д. Теория пластических деформаций металлов / А.Д.Томленов – М.: Машгиз, 1951. –200 с.
- 109.Арышенский, Ю.М. Элементы теории упругости и пластичности в авиастроении / Ю.М.Арышенский, В.В.Уваров –Куйбышев, 1978.
- 110.Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я.Выгодский –М.: Наука, 1969. –872 с.
- 111.Костышев, В.А. Исследование технологического процесса изготовления раскатных тонкостенных бесшовных профильных колец авиационных двигателей: дис... канд.техн.наук.–Куйбышев, 1982. –219 с.