

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

Л. А. ДУДАРЬ

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
СВАРНЫХ УЗЛОВ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
ИЗ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Конспект лекций

КУЙБЫШЕВ 1989

**Особенности изготовления сварных узлов летательных аппаратов из термоупрочняемых алюминиевых сплавов: Конспект лекций / Л. А. Дударь; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 47 с.**

Излагаются наиболее прогрессивные технологические процессы получения сварных соединений из термоупрочняемых алюминиевых сплавов, направленные на повышение механических свойств. Дан научный анализ влияния различных способов сварки плавлением на свойства сварных соединений из термоупрочняемого сплава 1201. Рассматриваются различные способы компенсации потери прочности сварного соединения под действием высокотемпературного нагрева. Особое внимание уделено изложению научных основ повышения механических свойств сварных соединений из термоупрочняемых материалов, в частности узлов типа обечаек из сплава 1201, и получения их равнопрочности.

Пособие предназначено для студентов старших курсов дневной и вечерней форм обучения и слушателей курсов повышения квалификации ИТР по специальностям 11.08, 13.01.

Печатается по решению редакционно-издательского совета института

Рецензенты: А. Е. Эйдельштейн, В. П. Ермица

## ВВЕДЕНИЕ

К деталям и узлам летательных аппаратов предъявляются требования повышенной прочности и надежности в эксплуатации при минимальной их массе. Эти требования могут быть выполнены при использовании термоупрочняемых материалов с наибольшей удельной прочностью.

Прочностные свойства соединения из термоупрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов, выполняемых сваркой плавлением, всегда ниже прочности основного материала, что обусловлено литой структурой металла шва и образованием зоны термического влияния под действием высокотемпературного нагрева.

В связи с этим в предлагаемом пособии рассматривается влияние различных способов сварки плавлением на свойства сварных соединений термоупрочняемых сплавов. Установлено, что сварка более концентрированными источниками тепла с меньшей погонной энергией позволяет получить соединение с меньшей зоной термического влияния и более прочное (при прочих равных условиях).

Комбинируя очередность операций сварки, закалки и старения, удастся повысить механические свойства соединений, однако при этом не всегда достигается их равнопрочность с основным материалом.

Чаще всего компенсацию потери прочности зоны сварного соединения выполняют путем утолщения кромок в области стыка, но такое решение связано с увеличением массы самих конструкций.

В предлагаемом пособии особое внимание уделено изучению возможности получения равнопрочного соединения сварной конструкции типа обечайки из сплава 1201 с использованием термомеханической обработки. Рассмотрены особенности оборудования для осуществления операции пластической деформации раскатки кольца сварной обечайки и проведения операций термической обработки.

# 1. СВАРКА ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

## 1.1. СВОЙСТВА ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При изготовлении сварных конструкций летательных аппаратов в последнее время все большее применение находят термически упрочненные алюминиевые сплавы. При сварке плавлением их механические свойства сильно ухудшаются в результате структурных и фазовых превращений, определяемых условиями выделения и распределения тепла. В связи с этим приобретает актуальность изыскание способов сварки, отличающихся высоким коэффициентом полезного действия, проплавляющей способностью и малой погонной энергией.

В ИЭС им. Е. О. Патона исследованы свойства сварных соединений новых термически упрочняемых алюминиевых сплавов 1201, 1915, 01381, 01420 [1]. Эти сплавы представляют различные системы легирования и благодаря сравнительно высокому сопротивлению образованию горячих трещин представляют интерес для изготовления ответственных сварных конструкций. Механические свойства сварных листов толщиной 3 мм из этих сплавов в упрочненном состоянии и их соединений, полученных аргонодуговой сваркой, приведены в табл. 1.1.

Кривые изменения твердости в шве и зоне термического влияния приведены на рис. 1.1. Исходное состояние листов перед сваркой обозначено:  $\circ$  — закаленное,  $\times$  — искусственно состаренное. Для сплавов 1915 нижние ветви кривых на рис. 1.1, ж соответствуют твердости в течение 1 суток после сварки, а верхние после естественного старения — в течение 30 суток. Вертикальной штриховой линией отмечен переход от шва к зоне термического влияния. Общие для всех сплавов закономерности заключаются в следующем. Ширина участков разупрочнения непосредственно после сварки меньше для листов в искусственно состаренном состоянии по сравнению с закаленным (и естественно состаренным) состоянием. Это объясняется прежде всего различным характером процессов, сопро-

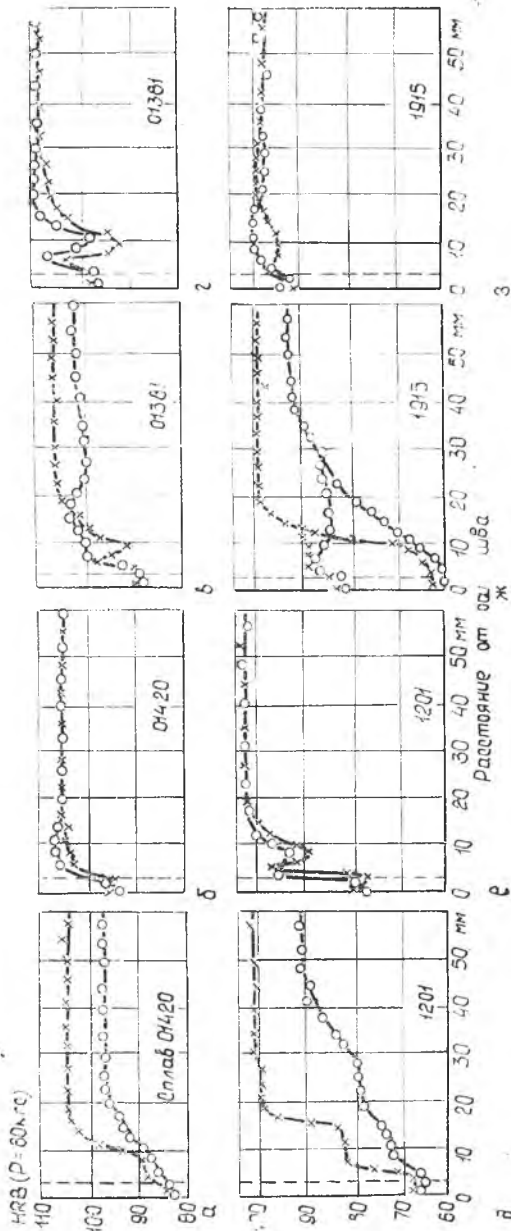


Рис. 1.1. Распределение твердости в шве и зоне термического влияния после сварки (а, в, д, ж) и искусственного старения соединений (б, г, е, з)

Механические свойства термически упрочненных листов  
 $S = 3$  мм и их сварных соединений [1]

Марка сплава, система легирования	Термообработка листов перед сваркой	Листы			Сварные соединения			
		$\sigma_{нл}$	$\sigma_{02}$	$\delta_1$	после сварки		после искус. сварки	
		МПа	МПа	%	$\sigma_{нл}$ МПа	$K_{сш}$	$\sigma_{нл}$ МПа	$K_{сш}$
01420 Al—Mg—Li	Закалка от 753 К, старение при 443 К, 10 ч.	470	320	8	360	0,77	400	0,85
01381 Al—Cu—Mg—Si	Закалка от 773 К, стар. при 443 К, 12 ч.	460	380	10	340	0,74	360	0,78
1201 Al—Cu—Mn	Закалка от 803 К, стар. при 443 К, 16 ч.	440	350	10	300	0,68	330	0,75
1915 Al—Zn—Mg	Закалка от 723 К, стар. при 373 К, 100 ч.	420	340	12	340	0,81	360	0,86
	Закалка от 723 К, стар. при 293 К, 30 сут.	380	220	16	330	0,79	370	0,88

Примечания: 1. При сварке сплавов 01420 и 1915 использовали присадочную проволоку СвАМг6, а сплавов 01381 и 1201 — проволоку Св.1201.

2. Для сплавов 1915 приведены значения сварных соединений после естественного старения при 293 К в течение 30 суток.

3. Режимы искусственного старения сварных соединений такие же, как и основного металла.

4. Коэффициент прочности соединений  $K_{сш}$  определен как отношение пределов прочности соединения и основного металла.

вождающих разупрочнение только закаленного (закаленного и естественно состаренного) или закаленного и искусственно состаренного сплава. Если в последнем случае зона разупрочнения заканчивается участками отжига и перестраивания примерно при 573 К, то в первых двух случаях в зону разупрочнения попадают также участки, где при более низких температурах происходит снятие наклепа нагартованных листов и возврат от естественно состаренного к свежезакаленному состоянию. Особенно это заметно на сплаве 1915.

## 1.2. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМОГО СПЛАВА 1201

Свойства сварных соединений термически упрочненного сплава 1201 обычно находятся в прямой зависимости от степени концентрации тепловой энергии, что обуславливается способом сварки. Применяя различные виды сварки, можно влиять на структуру металла шва, протяженность зоны термического влияния и степень ее разупрочнения, а значит, получать сварные соединения с заданными механическими свойствами.

Сплав 1201 упрочняется закалкой и искусственным старением. При естественном старении прочность металла практически не изменяется. Максимальное упрочнение сплава достигается в процессе старения закаленного твердого раствора при 433...453 К [2].

Под воздействием температур сварочного процесса неблагоприятное изменение свойств материала происходит не только в шве, но и в зоне термического влияния.

На рис. 1.2 приведены кривые изменения максимальных температур нагрева  $T_{max}$  и твердости HRB ( $P = 60$  кгс) в зоне термического влияния при аргодуговой сварке листов толщиной 5 мм из сплава 1201 в термически упрочненном состоянии, где 1 — твердость после сварки; 2 — после искусственного старения при 448 К, 10 ч.

Разупрочненный в процессе сварки материал при повторном искусственном старении частично восстанавливает твердость на всем протяжении зоны термического влияния, а провалы на кривой твердости смещаются в зону действия более низких температур. Анализ влияния температуры нагрева на физико-механические свойства сплава 1201 в зоне термического влияния сварки можно провести по кинетическим диаграммам разупрочнения сплава в условиях, имитирующих термические циклы сварки (рис. 1.3), и микроструктурам (рис. 1.4).

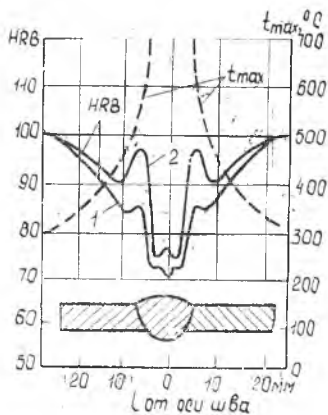


Рис. 1.2. Кривые изменения максимальных температур нагрева и твердости HRB ( $P = 60$  кгс) в зоне термического влияния при аргодуговой сварке листов толщиной 5 мм из сплава 1201 в термически упрочненном состоянии: 1 — твердость после сварки, 2 — после искусственного старения соединения при 448 К, 10 ч

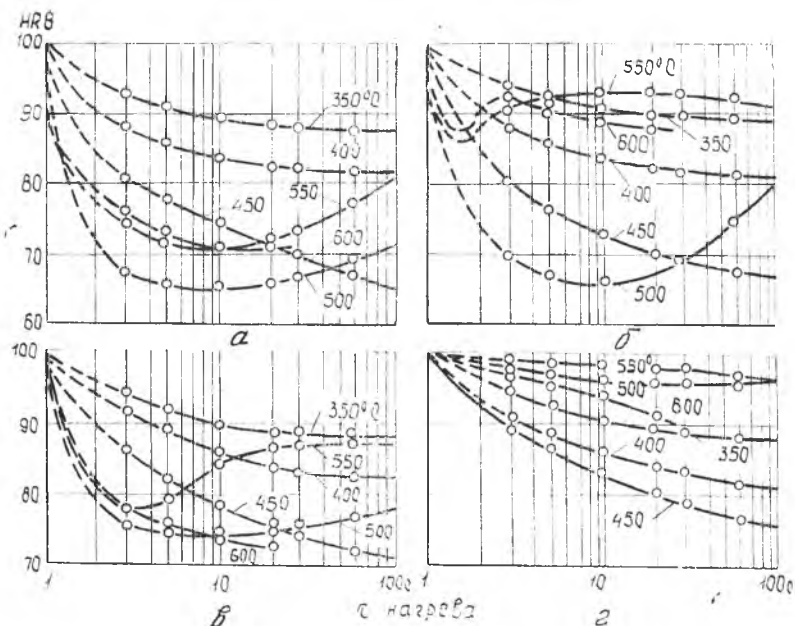


Рис. 1.3. Кривые изменения твердости в зависимости от температуры и времени нагрева в оловянной ванне термически упрочненного сплава 1201 при охлаждении на воздухе (а, б) и в воде (в, г) после нагрева — охлаждения (а, в) и дополнительного искусственного старения (б, г)

Как видно из рис. 1.3,а, интенсивность разупрочнения металла вследствие более полного распада твердого раствора увеличивается с повышением температуры нагрева до 723 К. Повторное искусственное старение практически не изменяет твердость сплава (рис. 1.3,б). Распад твердого раствора сопровождается приращением и коагуляцией частиц упрочняющей фазы (рис. 1.4,а,б). При нагреве до 773 К с увеличением его продолжительности разупрочнение сменяется повышением твердости. Это происходит в результате повторного растворения выделившихся ранее частиц (рис. 1.4,в) и образования свежего твердого раствора, способного дополнительно упрочниться после искусственного старения (рис. 1.4,б).

Особенно быстро этот переход происходит при 823 К. При 823...873 К наступает перегрев сплава и расплавляются вторичные выделения по границам зерен (рис. 1.4,г)).

Охлаждение в воде повышает твердость металла после нагрева до одинаковых температур (1.3,в). Повторное искусствен-



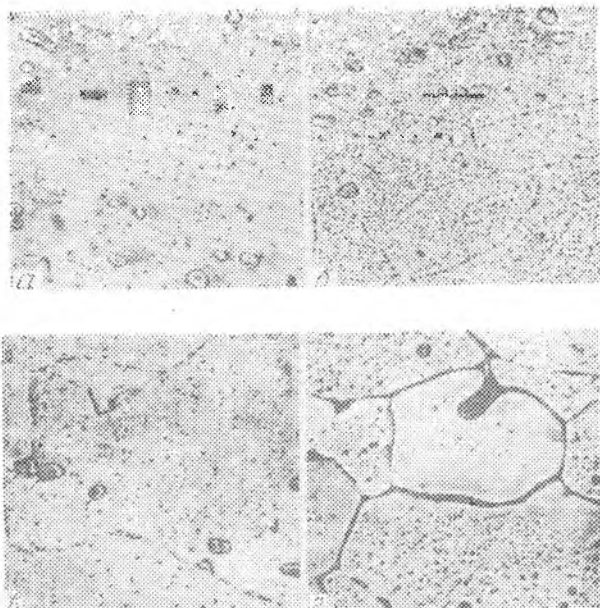


Рис. 1.4. Микроструктура сплава 1201 в исходном термически упроченном состоянии (*a*) и после различных температурно-временных воздействий: *b* — 623 К, 60 с; *v* — 773 К, 60 с; *z* — 873 К, 20 с (охлаждение на воздухе,  $\times 600$ , уменьш. 3/5)

ное старение таких образцов существенно повышает их твердость уже в случае нагрева при 723 К (рис. 1.3,г). Это свидетельствует о возможности частичного растворения упрочняющих фаз или так называемого возврата к закаленному состоянию. Вероятность этого явления возрастает с повышением температуры и уменьшением времени нагрева. После быстрого нагрева и охлаждения возврат к закаленному состоянию может проходить параллельно с выделением и коагуляцией стабильных фаз, вызывающих разупрочнение твердого раствора.

С увеличением времени нагрева при высоких температурах ранее выделившиеся упрочняющие дисперсные частицы интенсивно растворяются, и после охлаждения в воде и искусственного старения исходная твердость сплава восстанавливается (рис. 1.3,г). Малая продолжительность нагрева при температурах выше 623 К приводит к частичному возврату сплава к закаленному состоянию, а ниже 573 К микроструктура и твердость практически не изменяются.

По работам ИЭС им. Е. О. Патона приведены результаты исследований сварки встык без разделки кромок пластин толщи-

ной 15 мм из сплава 1201, предварительно закаленных от 803 К в воду с последующим искусственным старением при 453 К, 10 ч. Исследования проводились при различных способах сварки: *а* — электронно-лучевой; *б* — в гелии на постоянном токе прямой полярности; *в* — плазменно-дуговой на переменном токе; *г* — аргонодуговой на переменном токе по режимам, приведенным в табл. 1.2 [3].

Таблица 1.2

Сварка	$I_{св},$ А	$U,$ В	$v, \text{ м/ч}$	$q/v,$ кДж/см
Электронно-лучевая	0,18...0,19	26000	40	3,35
В гелии на постоянном токе прямой полярности	480...490	12	10	17,6
Плазменно-дуговая на переменном токе	640...660	26	12	19,7
Аргонодуговая вольфрамовым электродом на переменном токе	620...640	16	6	24,3

Как видно, рассчитанные значения погонной энергии существенно отличаются при исследованных способах сварки. По этому показателю электронно-лучевая сварка в пять—семь раз эффективнее других способов.

Характер разупрочнения металла зоны термического влияния иллюстрирует рис. 1.5, где даны кривые изменения твердости металла зоны термического влияния при различных способах сварки. Пики на кривых твердости соответствуют участкам околосшовной зоны, где произошла частичная закалка во времени термического цикла сварки. Последующее искусственное старение соединений способствовало повышению твердости

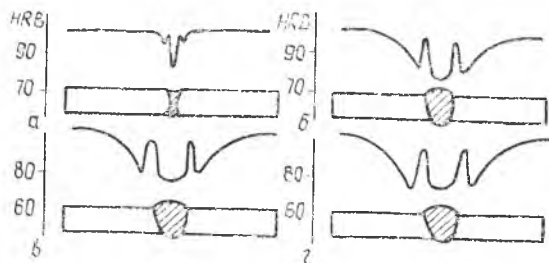


Рис. 1.5. Изменение твердости металла зоны термического влияния при различных способах сварки плит толщиной 15 мм из термически упроченного сплава 1201 (*а* — электронно-лучевая сварка; *б* — сварка в гелии; *в* — плазменная сварка; *г* — аргонодуговая сварка)

металла в этих участках по сравнению с более удаленными от шва зонами, в которых вследствие сварочного нагрева материал разрушился (произошел отжиг).

Общая ширина участка разрушения по обе стороны шва зависит от тепловложения и составляет: при сварке электронным лучом 15—20 мм, в гелии на постоянном токе 40..50 мм, при плазменно-дуговой сварке 60..65 мм и аргодуговой 65...70 мм.

Механические свойства соединений приведены в табл. 1.3 [3].

Таблица 1.3

Механические свойства сварных соединений сплава 1201, выполненных различными способами

Сварка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\alpha$ , град.	$a_k$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{вс}}{\sigma_{в0м}}$
Электронно-лучевая	304	29	26	0,70
В гелии на постоянном токе прямой полярности	297	35	21	0,68
Плазменно-дуговая	264	20	14	0,60
Аргодуговая	244	18	12	0,56
Основной металл	435	35	13	—

Примечание. Значения  $a_k$  относятся к металлу шва.

Как видно из табл. 1.3, наиболее высокое временное сопротивление разрыву имеют соединения, выполненные электронным лучом и сваркой в гелии на постоянном токе. Эти соединения отличаются большой пластичностью (углом загиба и ударной вязкостью) металла шва по сравнению с полученными плазменно-дуговой сваркой.

Предел прочности соединений, выполненных электронным лучом и сваркой в гелии на постоянном токе, достигает 0,7 этого же показателя основного термически обработанного металла. При аргодуговой и плазменно-дуговой сварке  $\sigma_{вс}/\sigma_{в0м} = 0,56$  и 0,60 соответственно.

Вследствие большего тепловложения при аргодуговой и плазменно-дуговой сварке на переменном токе образуется грубая структурная неоднородность в металле шва и зоне термического влияния, неблагоприятно влияющая на технологическую и конструктивную прочность соединений.

Сварка электронным лучом и дуговая на постоянном токе прямой полярности оказывает меньшее тепловое воздействие на соединяемый металл, в результате чего структура шва более плотная, мелкозернистая, исключая грубые выделения

хрупких фаз по границам зерен в зоне термического влияния.

Характерная микроструктура металла шва в зоне сплавления и при различных способах сварки представлена на рис. 1.6. При сварке электронным лучом и в гелии на постоянном токе структура лучше, чем при аргонодуговой и плазменно-дуговой сварке на переменном токе. При сварке на переменном токе при большой погонной энергии в зоне термического влияния оплавляются выделения по границам зерен и в участке взаимной кристаллизации возникает сплошная грубая сетка хрупких мелкозернистых прослоек. При сварке в гелии на постоянном токе и особенно при электронно-лучевой сварке изменения менее заметны и в зоне термического влияния практически сохраняется исходная структура основного металла.

Микрорентгеноспектральное исследование на приборе «Комека» (диаметр пятна облучения 2 мкм) показало, что при переходе от аргонодуговой к электронно-лучевой сварке уменьшается неоднородность металла шва и зоны термического влияния, а также степень распада твердого раствора меди в алюминии. Содержание меди в твердом растворе от 4 до 6% (у линии плавления). Очевидно, более высокая прочность соединений, выполненных сваркой электронным лучом и в гелии на постоянном токе прямой полярности, может быть объяснена меньшим термическим влиянием на строение зоны термического влияния шва 1201.

Из рассмотренных ранее способов сварки плавлением термически упрочняемых и нагартованных деформируемых алюминиевых сплавов прочностные свойства соединений в разной степени (в зависимости от способа сварки), но всегда уступают прочности свариваемого материала. Это обусловлено наличием в соединении литого участка — металла шва — и теми структурными и фазовыми изменениями в основном металле зоны термического влияния, которые происходят под действием высокотемпературного нагрева.

Сравнение потенциальных возможностей известных методов сварки показали, что для изготовления конструкций из термоупрочняемых сплавов наиболее перспективными являются методы гелиево-дуговой сварки постоянным током прямой полярности и электронно-лучевая сварка.

Стабильность процесса гелиево-дуговой сварки, как отмечалось ранее, обеспечивается за счет некоторого смещения сварочной дуги по направлению к переднему фронту сварочной ванны применением электрода с эксцентричной заточкой [4]. Дальнейшие исследования, проведенные на предприятии отрасли, показали, что аналогичный положительный эффект смещения дуги может быть достигнут установкой на сопловую часть

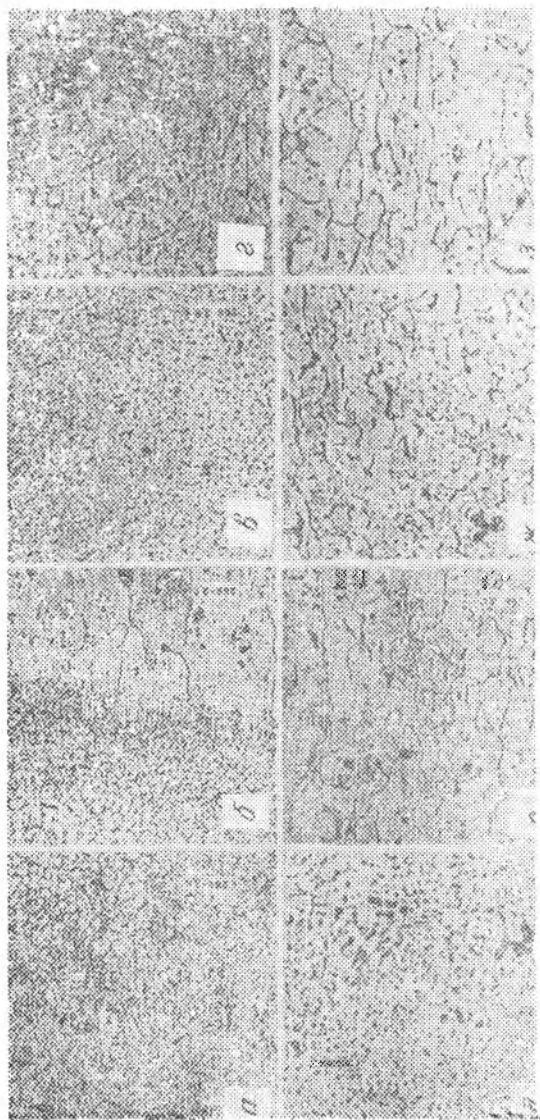


Рис. 1.6. Микроструктура металла шва (*а, в, д, ж*) и зоны сплавления (*б, г, е, з*) при различных способах сварки плит толщиной 15 мм из сплава 1201 ( $\times 50$ , уменьшение  $2/3$ ): *а, б* — электронно-лучевая сварка; *в, г* — сварка в гелии на постоянном токе прямой полярности; *д, е* — плазменно-дуговая сварка на переменном токе; *ж, з* — аргонодуговая

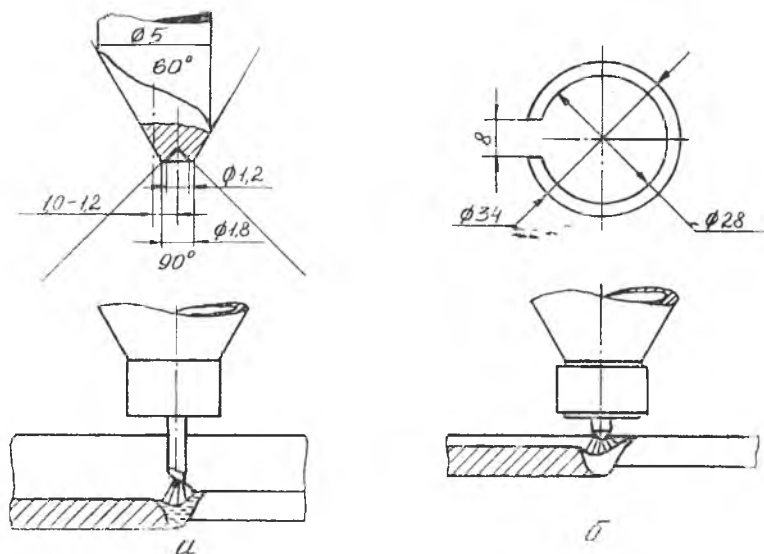


Рис. 1.7. Обеспечение стабильности процесса гелиево-дуговой сварки за счет: а) некоторого смещения сварочной дуги по направлению к переднему фронту сварочной ванны применением электрода с эксцентричной заточкой; б) смещения дуги установкой на сопловую часть горелки разрезного ферромагнитного сопла

горелки разрезанного ферромагнитного кольца (рис. 1.7). Установлено, что электрод с эксцентричной заточкой целесообразно применять для сварки повышенных толщин по глубокой разделке, разрезанное ферромагнитное кольцо — при сварке соединений без разделки кромок.

При гелиево-дуговой сварке повышенных толщин (15—20 мм) без разделки кромок с проплавлением их на всю толщину ширина зоны разупрочнения составляет 45—60 мм на сторону. В целях уменьшения ширины этой зоны и тем самым улучшения весовых характеристик конструкции разработана технология сварки по узкой разделке шириной 6—8 мм, где сплавление корня толщиной 8—10 мм осуществляется гелиево-дуговой сваркой, а разделка заполняется плавящимся электродом (рис. 1.8) [4]. Применение многопроходной сварки для толщины 15—20 мм позволило уменьшить зону разупрочнения с 45—60 мм до 15—18 мм (рис. 1.8,а). При многопроходной сварке толщин 40—50 мм ширина зоны термического влияния не превышает 15 мм на сторону (рис. 1.8,б).

Технология сварки включает следующие операции: скоростная прихватка по всей длине шва гелиево-дуговой сваркой;

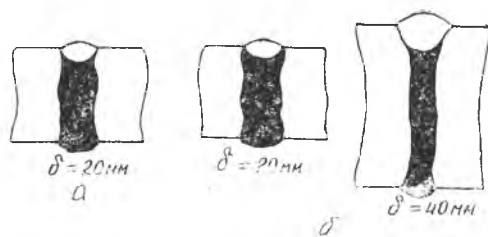


Рис. 1.8. Уменьшение зоны разупрочнения при гелиево-дуговой сварке повышенных толщин за счет технологии сварки по узкой разделке шириной 6—8 мм, оплавлением корня толщиной 8—10 мм и заполнением разделки плавящимся электродом

сплавление кромок гелиево-дуговой сваркой; наплавка усиления аргонодуговой сваркой или заполнение разделки сваркой плавящимся электродом.

Необходимость применения скоростной прихватки по всей длине стыка продиктована тем, что при сварке крупногабаритных сборок сложное напряженное состояние металла в зоне теплового воздействия сварочной дуги вызывает деформации свариваемых кромок с образованием хлопнунов и смещений, что повышает склонность к прожогам. Как показал опыт, скоростная прихватка при глубине проплавления 20—25% от толщины листа обеспечивает надежную фиксацию кромок после сборки узлов в приспособлении и практически до нуля стягивает сборочные зазоры, если их исходная величина не превышает 1,0 мм.

Интересным примером использования возможностей гелиево-дуговой сварки является сварка кольцевых швов обечаек емкости при вертикальной сборке. При такой технологической схеме сборки экономится производственная площадь, облегчается процесс сборки, повышается геометрическая точность емкости. Однако при сварке горизонтальным швом на вертикальной стенке во избежание «утяжин» в корневой части шва оказалось необходимым создание небольшого разряжения (20...30 мм, вод. ст.) с обратной стороны шва.

Дальнейшее совершенствование гелиево-дуговой сварки позволило отказаться от подкладных устройств вообще. Сварка ведется «на весу» с одновременным контролем формирования проплава и синхронной корректировкой режима, обеспечивая тем самым стабильные геометрические характеристики сварного соединения.

В этом случае для предотвращения «утяжин» в проплаве сварка проплавливающего прохода ведется с дозированной подачей присадочной проволоки.

Производственное освоение процесса гелиево-дуговой сварки для изготовления емкостей из алюминиевого сплава 1201 показало возможность обеспечения высокого качества. Прочность сварных соединений составляет 240...280/265 МПа, что превышает 0,55 от фактической прочности основного металла.

Наиболее нагруженными швами в цилиндрических емкостях являются продольные швы обечаек, выполняемые в вертикальном положении электроно-лучевой сваркой с горизонтальным лучом.

Вакуумирование зоны сварки осуществляется местной камерой, в которой электронная пушка (ЦЭП-4) перемещается

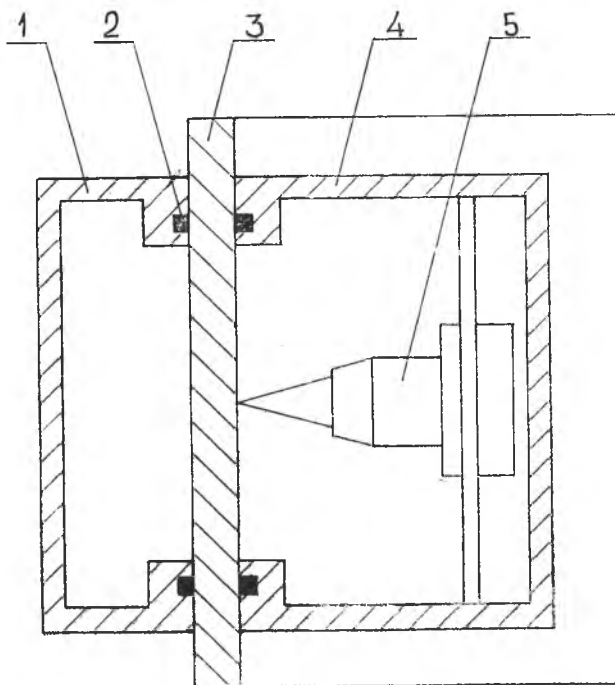


Рис. 1.9. Схема электроно-лучевой сварки с местным вакуумированием: 1 — вспомогательная камера со стороны корня шва, формируемого «на весу»; 2 — вакуумные уплотнения; 3 — свариваемое изделие; 4 — основная камера со своим вакуумным уплотнением; 5 — электроно-лучевая пушка



в вертикальном направлении по всей длине стыка обечайки. Для обеспечения необходимой степени разряднения в рабочей зоне ( $10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) применяется стандартное вакуумное оборудование, обычно используемое в составе электронно-лучевых установок с камерами общего вакуумирования. Схема электронно-лучевой сварки с местным вакуумированием показана на рис. 1.9.

В целях предотвращения избыточных деформаций в процессе сварки и возникновения в процессе сварки чрезмерных зазоров осуществляется сплошная прихватка стыка.

Оптимальные режимы сварки сплава 1201 толщиной 20 мм, обеспечивающие соединения с высокой плотностью и прочностью, составляющей не менее 73% фактической прочности основного материала, и зоной разупрочнения около 8,0 мм (на сторону от центра шва), приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Оптимальные режимы электронно-лучевой сварки сплава 1201 толщиной 80 мм

Наименование прохода	Скорость сварки, м/ч	Ускоря- ющее на- пряже- ние, кВ	Ток луча, мА	Положе- ние фо- кального пятна, мм	Поперечные коле- бания луча	
					Частота, Гц	Ампли- туда, мм
Прихватка	45±1	25±0,5	110±5	+45±5	—	—
Сварка	30-1	25±0,5	270±10	-25±5	—	—
Разглаживание	45±1	25±0,5	140±5	+50±5	50	2±0,5

### 1.3. ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЕЧАЕК БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА ИЗ СПЛАВА 1201 С РАВНОПРОЧНОСТЬЮ СВАРНЫХ ШВОВ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан и осуществлен способ изготовления обечаек из сплава 1201 с механическими свойствами шва после старения на уровне свойств основного металла в термически упрочненном состоянии, создан новый технологический процесс изготовления сварных конструкций с заданными свойствами [5].

Сварка продольного шва толстостенных обечаек осуществлялась стационарным электронным лучом мощностью 20,5...33,6 кВ при  $v_{св} = 20$  м/ч вертикальными швами на подъем с полным проплавлением. Затем осуществлялась термомеханическая обработка цилиндрических заготовок по схеме: отжиг,

деформация, закалка, деформация, искусственное старение. Примерная схема последовательности операций сварки и термомеханической обработки сварных обечаек приведена на рис. 1.10.

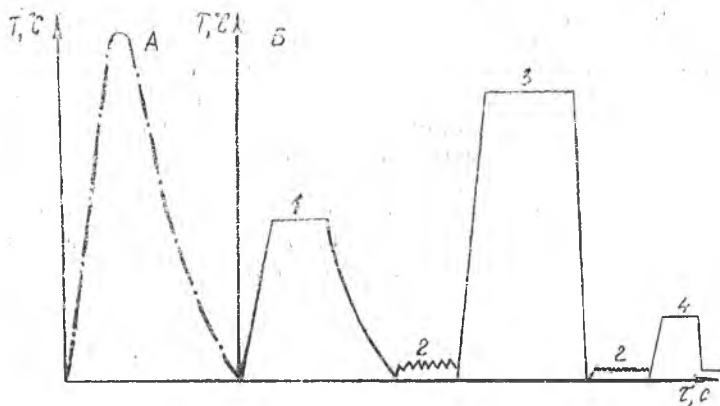


Рис. 1.10. Примерная схема последовательности операций сварки и термомеханической обработки сварных обечаек: А — термический цикл электронно-лучевой сварки; Б — термомеханическая обработка; 1 — отжиг сварных заготовок; 2 — одно- или двухступенчатая деформация обечаек раскаткой; 3 — нагрев и выдержка под закалку; 4 — искусственное старение

Свойства основного металла и сварных соединений в состоянии до пластической деформации представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Механические свойства основного металла и сварных соединений из сплава 1201 до пластической деформации

Толщина заготовки, мм	Металл	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$a_k$ , Дж/см <sup>2</sup>
10	Основной	218	215	11,2	30,3
	Соединение	217	215	7,9	30,8
95	Основной	174	119	10,2	25,5
	Соединение	172	118	8,7	24,8

Механические характеристики сплава 1201 и его соединений после термомеханической обработки приведены в табл. 1.6, 1.7, 1.8 [5]. Механические испытания проводились на образцах, вырезанных из трубчатых заготовок после раскатки.

Из табл. 1.6 видно, что независимо от предварительной де-

формации достаточно осуществить с определенной степенью окончательную деформацию, чтобы обеспечить механические свойства шва после старения на уровне свойств основного металла в термически упрочненном состоянии. Как показали испытания, равнопрочность обеспечивается и в условиях криогенных температур.

Таблица 1.6

**Механические свойства сварных соединений из сплава 1201 после окончательной деформации и термического упрочнения независимо от предварительной деформации**

Цикл термомеханической обработки	Ш о в			Основной металл		
	$\sigma_{п}$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{п}$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %
Отжиг	177	127	12,1	188	118	20,2
Отжиг — раскатка по режиму 2 — закалка	338	192	22,2	332	193	25,0
То же и старение	432	300	17,1	444	304	21,5
Отжиг — раскатка по режиму 2 — закалка — раскатка по режиму 4	475	444	8,7	455	425	7,3
То же и старение	508	462	9,7	499	455	9,8
Отжиг — раскатка по режиму 2 — закалка — раскатка по режиму 6	459	424	8,1	474	450	10,4
То же и старение	505	459	9,8	487	450	10,0

Примечание. Здесь и в табл. 1.3—1.5 степень деформации при раскатке по режимам 1...7 возрастает от 10 до 80%.

Таблица 1.7

**Механические свойства сварных соединений раскатных обечаек из сплава 1201 после термомеханической обработки без разделения деформации на предварительную и окончательную**

Цикл термической обработки	$\sigma_{п}$ , МПа	$\sigma_{02}$ , МПа	$\delta$ , %
Закалка	366	249	7,6
Закалка — старение	432	358	5,4
Закалка — раскатка по режиму 1	349	264	12,3
То же и старение	449	430	14,3
Закалка — раскатка по режиму 5	456	386	8,3
То же и старение	491	469	7,8
Закалка — раскатка по режиму 6	436	394	12,5
То же и старение	499	446	1,5
Закалка — раскатка по режиму 7	471	433	4,5
То же и старение	486	463	7,7

Механические свойства соединений раскатанных обечаек после термомеханической обработки без разделения деформации на предварительную и окончательную приведены в табл. 1.7. Установлено, что требуемая  $\sigma_b = 480$  МПа достигается при степени деформации, несколько большей, чем в случае с разделением деформации, но и здесь свойства шва выше, чем у основного металла.

Механические свойства шва и основного металла после наружной раскатки толстостенных обечаек представлены в табл. 13.

Таблица 1.8

**Механические свойства шва и основного металла после наружной раскатки толстостенных обечаек**

Цикл термической обработки	Ш о в			Основной металл		
	$\sigma_{II}$ МПа	$\delta_{0,2}$ МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{II}$ МПа	$\delta_{0,2}$ МПа	$\delta$ , %
<i>Продольные образцы</i>						
Отжиг	150	115	11,9	151	105	10,8
Отжиг — раскатка по режиму 2	222	211	5,6	218	204	6,2
То же и закалка	320	221	13,2	344	196	20,8
Отжиг — раскатка по режиму 2 — закалка — раскатка по режиму 3	402	356	7,0	391	351	5,65
То же и старение	475	427	6,2	472	419	6,1
<i>Поперечные образцы</i>						
Отжиг	157	125	15,7	154	116	14,9
Отжиг — раскатка по режиму 2	220	213	6,7	219	207	6,7
То же и закалка	342	195	20,3	346	200	23,0
Отжиг — раскатка по режиму 2 — — закалка — раскатка по режиму 3	393	344	9,85	409	353	10,5
То же и старение	479	425	8,8	474	427	8,6

Данные таблицы свидетельствуют о том, что в процессе наружной раскатки металла больших толщин (40...60 мм) термомеханическая обработка оказывает такое же влияние на свойства шва и основного металла, как и при раскатке тонкостенных оболочек.

Анализ микроструктуры позволил установить следующие основные закономерности.

Холодная деформация и последующая закалка приводят к образованию мелкозернистой рекристаллизованной структуры.

Холодная деформация после закалки вызывает обычные изменения структуры: границы зерен искривляются, зерна еще больше вытягиваются в направлении раскатки, внутри них заметны полосы скольжения. Очевидно, что с ростом суммарной

степени деформации структурные составляющие измельчаются.

Структура сварного шва характеризуется в 4—5 раз более мелким зерном по сравнению с основным металлом, и в этом заключается их основное различие. Имеет место также большая плотность и дисперсность избыточных фаз, что обусловлено высокими скоростями кристаллизации металла шва. Увеличение степени предварительной деформации перед закалкой приводит к уменьшению размеров рекристаллизованного зерна, образующегося в результате последующей закалки, что обеспечивает более высокие механические свойства.

## 2. ДЕФОРМАЦИЯ ОБЕЧАЕК РАСКАТКОЙ

### 2.1. ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

При анализе основных вопросов теории обычно рассматривают простейший случай прокатки прямоугольной полосы в валках с гладкой цилиндрической бочкой, причем диаметры и окружные скорости валков принимаются одинаковыми. Проходящая между валками полоса деформируется не по всему объему одновременно, а только на некотором участке. Этот участок называют очагом деформации.

Очаг деформации можно разделить на три зоны. Основная (контактная) зона ограничена поверхностями контакта полосы с валками, плоскостью входа в валки  $A-A_1$  и плоскостью выхода из валков  $B-B_1$  (рис. 2.1). К основной зоне со стороны переднего и заднего концов примыкают две внешние зоны (зоны внеконтактной деформации). Размеры внешних зон и характер деформации в них еще мало изучены, поэтому под термином «очаг деформации» обычно понимают его основную зону, имея при этом в виду существование внешних зон и при необходимости учитывая их действие.

При прокатке прямоугольной полосы в цилиндрических валках одинакового диаметра очаг деформации можно характеризовать следующими геометрическими параметрами (рис. 2.1):

1)  $S_0$  — толщина полосы до прохода,  $S_1$  — толщина полосы после прохода,  $\Delta S = S_0 - S_1$  — абсолютное обжатие,  $S_c = \frac{S_0 - S_1}{2}$  — средняя высота очага деформации;

2)  $b_0$  — ширина полосы до прохода,  $b_1$  — ширина полосы после прохода,  $b_c = \frac{b_0 - b_1}{2}$  — средняя ширина очага деформации или средняя ширина контактной поверхности;

3)  $R$  — радиус валка;

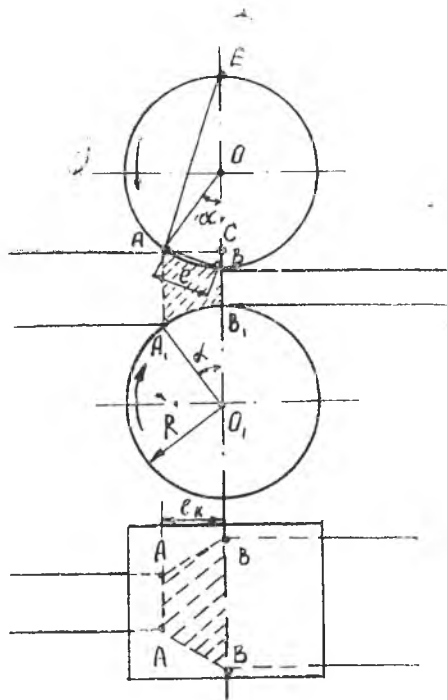


Рис. 2.1. Зоны очага деформации

4)  $l$  — длина контактной поверхности,  $l_x$  — горизонтальная проекция длины контактной поверхности (вертикальная ее проекция равна  $0,5 \Delta S$ );

5)  $\alpha$  — угол захвата;

6)  $F$  — площадь контактной поверхности.

За длину контактной поверхности  $l$  принимается длина хорды дуги контакта  $AB$ . Заведомо допускается небольшая ошибка (фактическая длина контактной поверхности равна длине дуги) и оправдывается не только упрощением расчета, но и тем обстоятельством, что при определении усилия контактное давление нужно умножать не на площадь контактной поверхности, а на ее проекцию, нормальную действию сил.

## 2.2. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ВАЛКА

Валки листовой прокатки разделяют на рабочие, производящие деформацию металла, и опорные, воспринимающие большие деформации изгиба рабочих валков и увеличивающие жест-

кость валкового узла. На большинстве прокатных станов рабочие валки являются приводными.

Для холодной прокатки диаметр бочки рабочего валка можно определить по формуле [6]

$$D > \frac{\Delta S}{1 + \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  — допустимый угол захвата ( $\alpha = 3 \dots 6^\circ$ ),  $\Delta S$  — абсолютное обжатие.

Влияние обжатия. С увеличением абсолютного обжатия увеличивается смещаемый по высоте объем и, следовательно, увеличивается вытяжка и уширение. Увеличение абсолютного обжатия приводит к увеличению длины контактной поверхности, а это увеличивает сопротивление деформации в продольном направлении. Вследствие этого удлинение увеличивается в меньшей мере, чем уширение. При уменьшении абсолютного обжатия уменьшаются и вытяжка, и уширение, но уширение уменьшается в большей мере, чем вытяжка, так как уменьшение длины контактной поверхности облегчает деформацию полосы в продольном направлении.

Влияние числа проходов. Одно и то же абсолютное обжатие можно получить за различное число проходов или за один проход, т. е. дробность деформации может быть различной. При большом числе проходов обжатие за каждый проход сравнительно невелико, в зависимости от этого небольшими будут длина контактной поверхности и сопротивление продольной деформации, что приводит к увеличению вытяжки и уменьшению уширения.

Итак, увеличение дробности деформации приводит к уменьшению уширения. Это обстоятельство следует учитывать при определении уширения за каждый проход, а затем определять общее уширение как сумму уширений за каждый проход [6].

Задаваясь относительным обжатием

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100\%,$$

где  $S_0$ ,  $S_1$  — толщина исходной и конечной заготовки соответственно, определяется абсолютное обжатие за проход  $\Delta S^1$  и диаметр валка.

Приводная шейка рабочего валка в связи с большими габаритами подшипников качения ограничивается по диаметру соотношением  $d_{ш} = (0,5 \dots 0,55)D$  [6].

Для подшипников жидкостного трения шейка выполняется максимальных размеров до  $0,7D$ , а места перехода шейки в бочку закругляются радиусами  $R = (0,05 \dots 0,12)d_{ш}$ .

Шейки приводных рабочих валков снабжаются тrefами: на больших валках — квадратными или двухжелобчатыми, на круглых — трех- и четырехжелобчатыми.

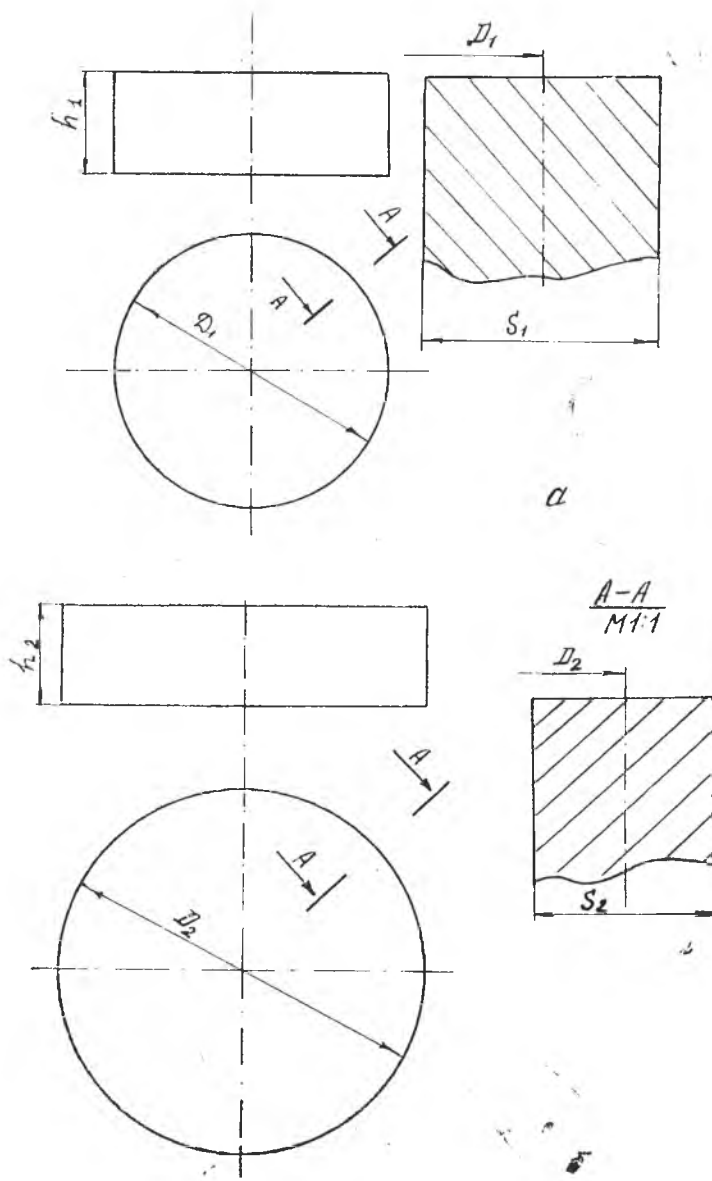


Рис. 2.2. Схемы определения размеров исходной заготовки и готовой цилиндрической обечайки



В рабочих валках с бочкой диаметром свыше 160 мм делаются осевые каналы, а в крупных — осевые камеры. С помощью осевого канала устраняется пористая ликвационная зона слитка, а при закалке валков с одновременным охлаждением осевого канала в этой зоне создаются полезные сжимающие остаточные напряжения [6].

Валки холодной прокатки должны иметь высокое качество поверхности после обработки.

### 2.3. РАСЧЕТ УШИРЕНИЯ ПРОКАТЫВАЕМОЙ ПОЛОСЫ

Определение уширения с учетом всех факторов, влияющих на него, является сложной задачей. Поэтому большинство формул для подсчета уширения содержат лишь основные влияющие на него факторы.

Широкое распространение получила формула Б. П. Бахтинова [7]

$$\Delta b = [1,15 \Delta S^1 / (2 S_0)] ( \sqrt{R \Delta S^1} - 0,5 \Delta S^1 / \mu_y ),$$

где  $\Delta S^1$  — обжатие за данный проход,  $S_0$  — толщина полосы до прохода,  $R$  — радиус валка,  $\mu_y$  — коэффициент трения, 0,2 (без смазки).

Определение размеров заготовки дано на рис. 2.2. Связь между размерами исходной заготовки и размерами готового кольца после раскатки определяются законом постоянства объема

$$S_0 b_0 L_0 = S_1 b_1 L_1,$$

где  $S_0, b_0, L_0$  — размеры заготовки;  $S_1, b_1, L_1$  — размеры готового кольца обечайки.

Уширение кольца обычно настолько мало, что при раскатке кольцо обечайки в осевом направлении не растет и его можно не учитывать, т. е.

$$L_0 = \frac{S_1 b_1 L_1}{S_0 b_0} = \frac{S_1 b_1 \cdot \pi D_1}{S_0 b_0}.$$

### 2.4. КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УСИЛИЕ ПРОКАТКИ

Полное усилие прокатки  $P$  — геометрическая сумма силы  $N$  (равнодействующей нормальных сил, действующих на валок) и силы  $T$  (геометрической суммы сил трения в зоне отставания  $T_1$  и в зоне опережения  $T_2$ ).

Как показано на рис. 2.3, силы  $P$  приложены к валкам в точках  $C$  и  $C^1$ , расположенных на одинаковом расстоянии от линии, соединяющей центры валков. Такое приложение сил характерно для симметричного процесса прокатки, когда оба валка — приводные, имеют одинаковые диаметры и окружные

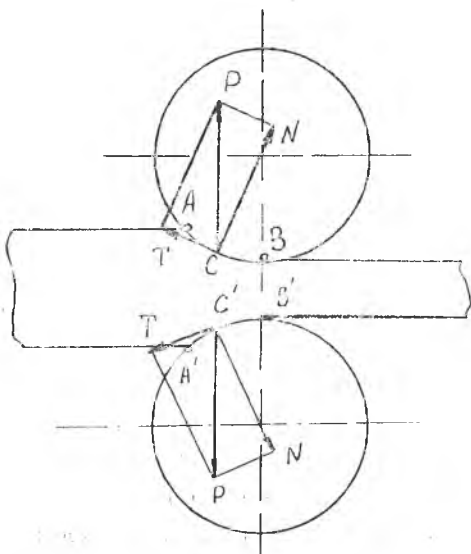


Рис. 2.3. Схема контактных усилий прокатки.

скорости, а металл по своим механическим свойствам одинаков. Со стороны валков на прокатываемую полосу действуют точно такие же, но противоположно направленные силы. Если на полосу действуют какие-либо другие силы, кроме сил, приложенных от валков, то по условию равновесия силы  $P$  должны быть направлены нормально к поверхности прокатываемой заготовки (рис. 2.3).

Величину усилия прокатки можно считать или непо-

средственно измерить на прокатном стане.

При аналитическом определении усилия прокатки нужно среднее контактное напряжение или (как будем называть его далее) контактное давление  $P_{\text{ср}}$  умножить на горизонтальную проекцию  $F_x$  поверхности контакта:

$$P = P_{\text{ср}} F_x.$$

В большинстве расчетов контактное давление умножают на площадь контактной поверхности  $F$ :

$$P = P_{\text{ср}} F.$$

Допускаемая при этом ошибка невелика, а расчет несколько упрощается.

Площадь поверхности контакта полосы с валком  $F$  определяется умножением средней ширины  $b_c$  на длину контактной поверхности  $l$ , но так как уширение очень мало, то  $b_c = b_0$ , тогда

$$F = b_0 \sqrt{R \cdot \Delta S}.$$

В общем виде формулу для определения контактного давления можно записать так:

$$P_{\text{ср}} = \sigma_{\text{ср}} \cdot n_b \cdot n_s,$$

где  $\sigma_{cp}$  — сопротивление деформации в условиях линейного напряженного состояния;  $n_b, n_\sigma$  — коэффициенты.

Коэффициент  $n_b$  учитывает влияние ширины полосы на контактное давление, его определяют по формуле

$$n_b = n_b' \cdot n_b'',$$

где  $n_b'$  — учитывает влияние  $\sigma_2$ , а  $n_b''$  — изменение влияния внешнего трения в связи с уширением.

Коэффициент  $n_b'$  изменяется в пределах 1,0...1,15. В зависимости от соотношения между шириной и длиной очага деформации изменяется соотношение между напряжениями  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в схеме напряженного состояния. В соответствии с этим изменяются условия уширения металла. При  $b/l \leq 1$ , когда имеются благоприятные условия для уширения металла,  $n_b' = 1$ . При  $b/l > 5$  принимают  $n_b' = 1,15$ .

Коэффициент  $n_b''$  можно определять по приближенной формуле А. И. Целикова [7]:

$$n_b'' = \frac{[1 (3 b_c - l) \mu_y l / (6 b_c S_c)]}{1 + \frac{0,5 \mu_y \cdot l}{S_c}},$$

где  $b_c$  и  $S_c$  — средняя ширина и толщина сечения прокатываемого материала. При отсутствии уширения  $n_b'' = 1,0$  [7].

Коэффициент  $n_\sigma$ , учитывающий влияние объемного напряженного состояния, определяется как произведение трех коэффициентов  $n_\sigma = n_\sigma' n_\sigma'' n_\sigma'''$ .

Для определения контактного давления воспользуемся формулой А. И. Целикова. Она является наиболее точной и учитывает многие факторы, влияющие на контактное давление при прокатке, его можно использовать для подсчета усилия горячей и холодной прокатки:

$$P_{cp} = \sigma_{cp} n_b \cdot n_\sigma [(S_n/S_1)^\epsilon - 1] 2 S_n / \Delta S' (\delta - 1),$$

где

$$\sigma_{cp} = (0,5...0,7) \sigma_T;$$

$$n_\sigma' = [(S_n/S_1)^\epsilon - 1] 2 S_n / \Delta S' (\delta - 1);$$

где  $S_n$  — толщина полосы в нейтральном сечении;  $S_1$  — толщина полосы после прохода;  $\delta = \frac{2 \mu_y l}{\Delta S'}$ ;  $\mu = 0,2$ ;  $l$  — длина дуги захвата.

Величина  $S_n$  определяется равенством

$$S_n = S_1 \left\{ \frac{[1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) (S_0/S_1)^\epsilon}]}{\delta + 1} \right\}^{\frac{1}{\epsilon}}.$$

Для упрощения определения  $n_\sigma'$  воспользуемся диаграммой зависимости  $n_\sigma'$  от  $\epsilon$  и  $\delta$  [7].

Коэффициент, учитывающий влияние внешних зон  $n''_{\frac{1}{2}}$ , определяется по формуле

$$n''_{\frac{1}{2}} = (l/S_c)^{-0.4} \quad \text{при} \quad l/S_c > 1 \quad n''_{\frac{1}{2}} = 1.$$

Коэффициент, учитывающий влияние напряжения или подпора, определяется по формуле

$$n'''_{\frac{1}{2}} = 1 - 0,5 (\sigma_0 + \sigma_1) / P'_{\text{ср}},$$

где  $\sigma_0$  — напряжение заднего конца полосы;  $\sigma_1$  — напряжение переднего конца полосы;  $P'_{\text{ср}}$  — контактное давление без учета натяжения.

В нашем случае натяжение отсутствует,  $n'''_{\frac{1}{2}} = 1$ .

Зная контактное давление, определяем усилие прокатки

$$P = P_{\text{ср}} F.$$

Определим угол захвата  $\alpha$  (рад):

$$\alpha = \sqrt{\Delta S' / R}.$$

## 2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПО МОМЕНТУ

Мощность прокатки, кВт

$$N_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} n_{\text{дв}} / 0,975,$$

где  $M_{\text{пр}}$  — момент, необходимый для привода валков;  $n$  — число оборотов валков в минуту.

Работа прокатки

$$W_{\text{пр}} = N_{\text{пр}} t,$$

где  $t$  — продолжительность прокатки,

$$t = n_{\text{тр}} / n_{\text{в}},$$

где  $n_{\text{тр}}$  — требуемое количество оборотов валка для  $n$  проходов;  $n_{\text{в}}$  — число оборотов валка за один проход.

Полный момент, необходимый для привода валков, может быть представлен в виде суммы:

$$M_{\text{дв}} = (M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{хх}} \pm M_{\text{п}}) \pm M_{\text{д}},$$

где  $M_{\text{пр}}$  — момент прокатки, необходимый для осуществления деформации металла в очаге деформации;  $M_{\text{тр}}$  — момент сил трения в подшипниках валков и других частях стана;  $M_{\text{хх}}$  — момент для привода стана при холостом ходе;  $M_{\text{п}}$  — момент от приложенного к полосе натяжения (в нашем случае  $M_{\text{п}} = 0$ );  $M_{\text{д}}$  — динамический момент, необходимый для преодоления

инерционных усилий, возникающих при неравномерном вращении валков.

Момент прокатки  $M_{пр} = 2Pa$  (рис.2.4), где  $a = \Psi \sqrt{R \cdot \Delta S'}$ ,  $\Psi$  — коэффициент плеча, показывающий, какую часть от длины очага составляет плечо:

$$M_{пр} = 2 P \Psi \sqrt{R \cdot \Delta S'}$$

По данным исследований [8]  $\Psi$  — для холодной прокатки листов — находится в пределах 0,3...0,4.

Момент трения. Момент дополнительных сил трения в главной линии привода одной клетки стана

$$M_{тр} = M_{тр1} + M_{тр2} + M_{тр3} + M_{тр4},$$

где  $M_{тр1}$  — момент сил трения в подшипниках валков;  $M_{тр2}$  — момент трения в шпинделях и муфтах;  $M_{тр3}$  — момент сил трения в шестеренной клетке;  $M_{тр4}$  — момент сил трения в редукторе.

Момент сил трения в подшипниках валков

$$M_{тр1} = P d \mu_n,$$

где  $P$  — усилие прокатки;  $d$  — диаметр шейки валков;  $\mu_n$  — коэффициент трения в подшипниках валков, по данным работы [8]  $\mu_n = 0,004$ .

Моменты трения в шпинделях, шестеренных клетях и редукторах можно учесть введением коэффициентов полезного действия. В таком случае общий момент трения определяется по формуле

$$M_{тр} = M_{тр1} + (M_{пр} + M_{тр1}) [(\eta_2 \eta_3 \eta_4)^{-1} - 1],$$

где  $\eta_2$  — КПД шпинделей и муфт, равен 0,94...0,98;  $\eta_3$  — КПД шестеренной клетки, равен 0,92...0,94;  $\eta_4$  — КПД редуктора, равен 0,92...0,94.

После подстановки в окончательном виде получим [8]

$$M_{тр} = (0,33...0,18) M_{пр} + (1,33...1,18) M_{тр1}.$$

Момент холостого хода. На основании практических данных можно принять, что момент холостого хода составляет 5...8% от номинального момента двигателя.

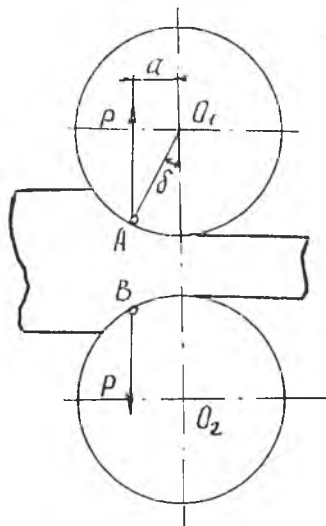


Рис. 2.4. Схема определения момента прокатки

В случае, когда раскатывается кольцо, захвата металла валками нет, процесс раскатки установившийся и валки вращаются с постоянной угловой скоростью без ускорения, динамический момент можно не учитывать.

## 2.6. ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВАЛКОВ

При ориентировочном расчете валок представляют в виде балки, установленной на двух опорах, с равномерно распределенной нагрузкой  $q$  (рис. 2.5):  $q = P/l$ .

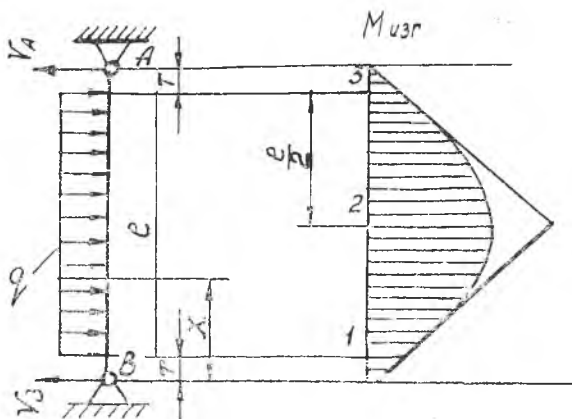


Рис. 2.5. Эпюры силы изгибающего момента, действующего на валок

Определяются реакции опор. Из расчетной схемы видно, что они будут одинаковыми и равными:

$$V_B = V_A = -\frac{ql}{2}$$

Изгибающий момент:

1.  $M_{изг} = V_B X$  при  $X \leq T$ ;

2.  $M_{изг} = V_B X + q \frac{(x-T)^2}{2}$  при  $T < X < T + l$ .

Определение  $M_{изг}$  в трех характерных точках:

В точке 1  $X = T$ ,  $M_{изг} = ql/2T$ .

В точке 2  $X = l/2$ ,  $M_{изг} = \frac{q}{2} \left( \frac{l}{2} + T \right)^2$ .

В точке 3  $X = l + T$ ,  $M_{изг3} = M_{изг1}$ ,

Напряженье  $\sigma_{\text{изг}} = M_{\text{изг}} / W_{\text{изг}}$ ,  
где  $W_{\text{изг}}$  — момент сопротивления при изгибе,

$$W_{\text{изг}} = -\frac{\pi D^3}{32} (1 - K^4),$$

где  $D$  — диаметр валка в расчетном сечении;  $K = d/D$ , где  $d$  — диаметр осевого канала.

Если валок будет без осевого канала  $K = 0$ , то

$$W_{\text{изг}} = \frac{\pi D^3}{32}.$$

Напряжения в бочке валка от действия крутящего момента не подсчитываются, поскольку они малы по сравнению с изгибающими. Валок должен обладать не менее, чем 5-кратным запасом прочности [6]. Для рабочего валка допустимое напряжение бочки — 400 и 450 МПа,  $\sigma_{\text{доп}}/\sigma_{\text{изг}} = 5$ . Шейку валка рассчитывают на изгиб и кручение:

$$M_{\text{изг max}} = M_{\text{изг}}; \quad M_{\text{кр}} = M_{\text{дв}};$$

$$\sigma_{\text{изг}} = M_{\text{изг}}/W_{\text{изг ш}}; \quad \tau_{\text{кр ш}} = M_{\text{кр}}/W_{\text{кр ш}},$$

где  $W_{\text{кр ш}} = \frac{\pi D^3}{16} (1 - K^4)$ ,  $K = 0$ .

Результирующее напряжение для стальных валков определяется по четвертой теории прочности:

$$\sigma_{\text{рез}} = \sqrt{\sigma_{\text{изг}}^2 + \tau_{\text{кр ш}}^2}; \quad \sigma_{\text{доп}}/\sigma_{\text{изг}} \geq 5.$$

Допустимые напряжения для шейки рабочего валка [6]  
 $\sigma_{\text{д}} = 300$  МПа.

## 2.7. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА РАСКАТНОЙ МАШИНЫ

Для конструкций горизонтальных раскатных машин можно выявить четыре основные схемы (рис. 2.6, а, б, в, г):

а) консольное расположение валков (как правило, нижняя опора);

б) накидная опора внутреннего валка — двухточечная;

в) накидная опора на оси внутреннего и наружного валка;

г) накидная опора со стороны наружного валка.

Рассмотрим достоинства и недостатки каждой из этих схем.

Схема «а». К достоинствам этой схемы можно отнести сравнительную простоту конструкции, возможность раскатывать кольца практически неограниченного диаметра, простоту операций загрузки и снятия заготовки.

Недостатки: неблагоприятная схема нагружения, невозможность раскатывать кольца большой ширины, ограниченность по

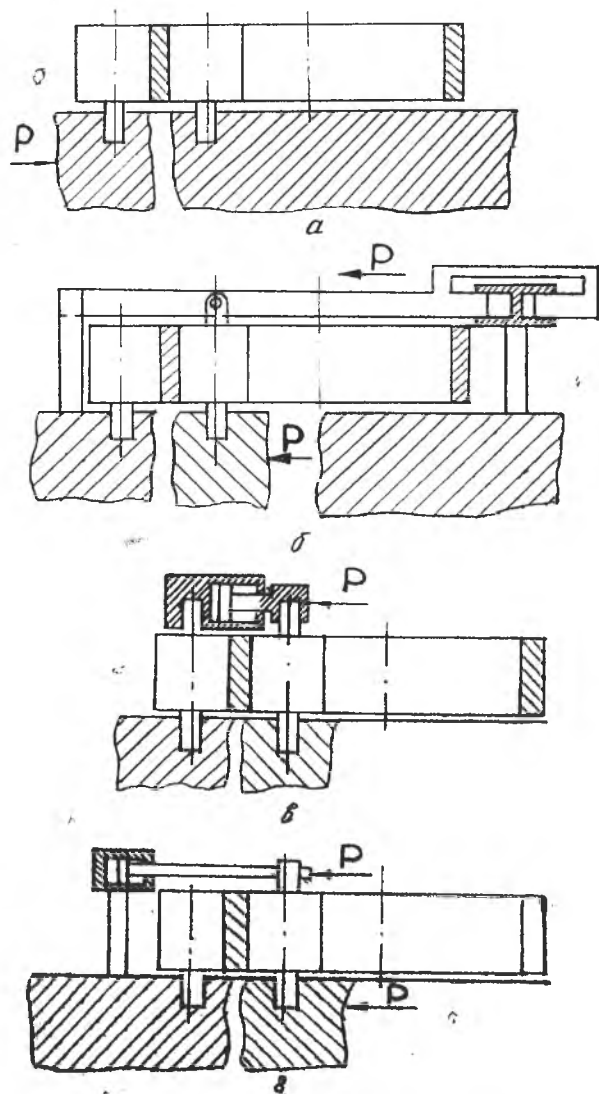


Рис. 2.6. Схемы конструкции раскатных машин



усилию прокатки, склонность к неравномерности деформации по ширине кольца.

Схема «б». Опора внутреннего валка имеет возможность перемещаться параллельно и перпендикулярно оси валка и поворачиваться вокруг оси стойки вместе с кольцом. Преимуще-

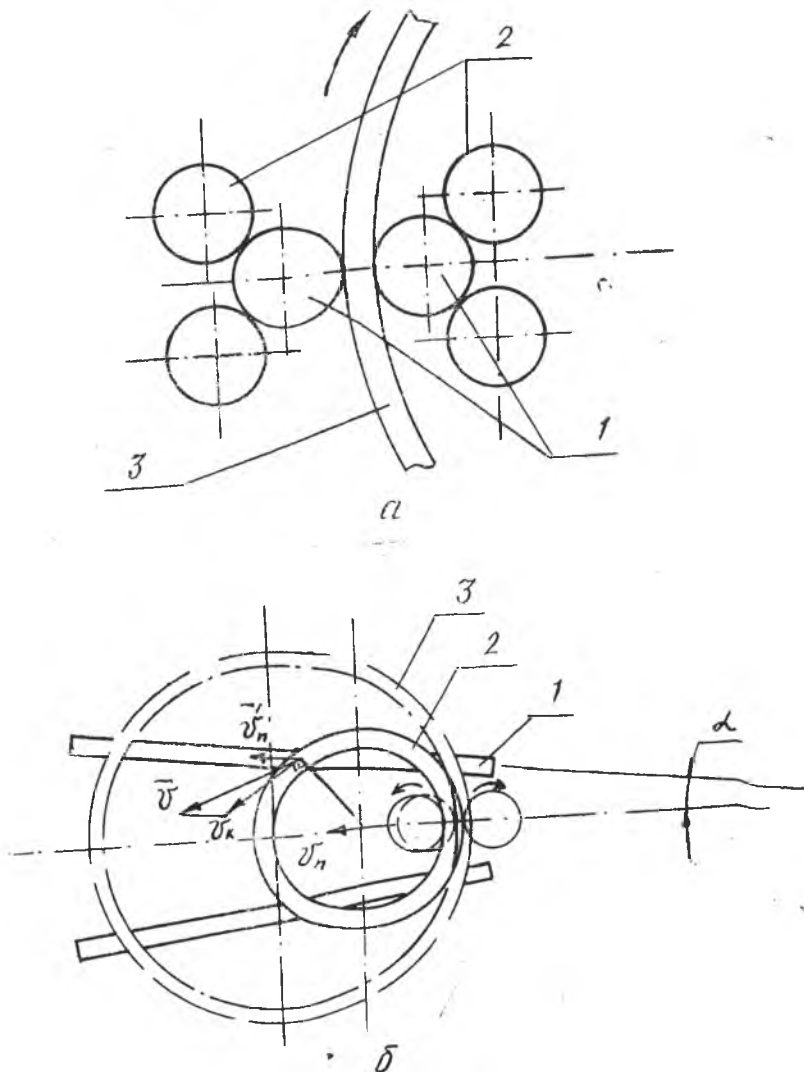


Рис. 2.7. Расположение валков при раскатке (а) и схема раскатного стана (б)

ством опоры является то, что она в процессе прокатки опирается на две точки и может работать на автоматическом режиме.

Недостатком опоры является то, что она усложняет конструкцию стана за счет установки дополнительного устройства, обеспечивающего поворот опоры при загрузке и выгрузке заготовок-колец. Кроме того, расположение опоры со стороны внутреннего вала затрудняет установку торцевых валков (особенно конической формы) против радиальной зоны деформации и ограничивает размеры прокатываемых колец по диаметру, а переход на прокатку колец более крупных размеров потребует увеличения габарита и массы стана.

Схема «в». Применение такой конструкции накидной опоры требует отдельного грузоподъемного механизма для ее снятия и одевания при загрузке и выгрузке заготовок-колец, что затрудняет осуществление полной автоматизации процесса прокатки и не гарантирует полного устранения прогиба валков.

В настоящее время более прогрессивным техническим решением по усовершенствованию конструкций опор главных валков в станах горизонтального (открытого) типа является установка накидной опоры со стороны наружного вала (схема «г»). Такое конструктивное выполнение накидной опоры позволяет устранить недостатки, указанные в предшествующих технических решениях, принятых для станов горизонтального типа [9].

Геометрические параметры раскатываемой детали и материал, из которого она изготовлена, предъявляют к конкретной конструкции ряд требований. Для раскатных станов подобного класса критерий  $L/d$  должен быть в пределах 3..5. В случае большего значения этого критерия трудно обеспечить требуемую жесткость валков к изгибающему моменту. Возникает склонность к неравномерности деформации по ширине прокатываемой заготовки. В то же время увеличение диаметра вала (с целью увеличения изгибной жесткости вала) приведет к увеличению длины контактной поверхности, что, в свою очередь, увеличит ширину заготовки, а также увеличит усилие прокатки  $P$  (рис.2.7).

Во избежание этих негативных явлений в конструкции стана целесообразно применить подпорные валки, которые крепятся в раскатной клети на гидродинамических опорах [10] и воспримут в основном усилие прокатки. Такая схема валков позволяет значительно увеличить  $W_{изг}$  без увеличения диаметра рабочего вала.

В случае раскатки кольцевых заготовок большой массы и малой жесткости из-за малой конечной толщины стенки возникает задача уменьшения трения раскатываемой заготовки с опорой, по которой она скользит при вращении и увеличении диаметра. В таких случаях применение опор скольжения недо-

пустимо, так как может привести к короблению детали и сильному износу ее кромок.

В конструкции стана для раскатки подобных заготовок целесообразно применять самоустанавливающиеся опоры качения (рис. 2.8). В процессе раскатки кольцо будет давить на упорный валик и каретка будет двигаться по направляющей. Оси направляющих и опорных валков ориентированы определенным образом, так что оси опорных валков всегда проходят через центр заготовки (рис. 2.9), где  $a_1, a_2$  — оси направляю-

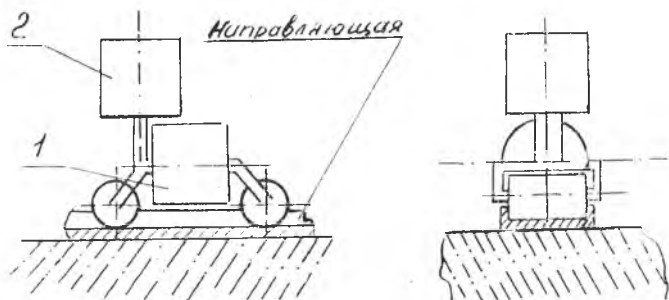


Рис. 2.8. Схема самоустанавливающейся опоры качения

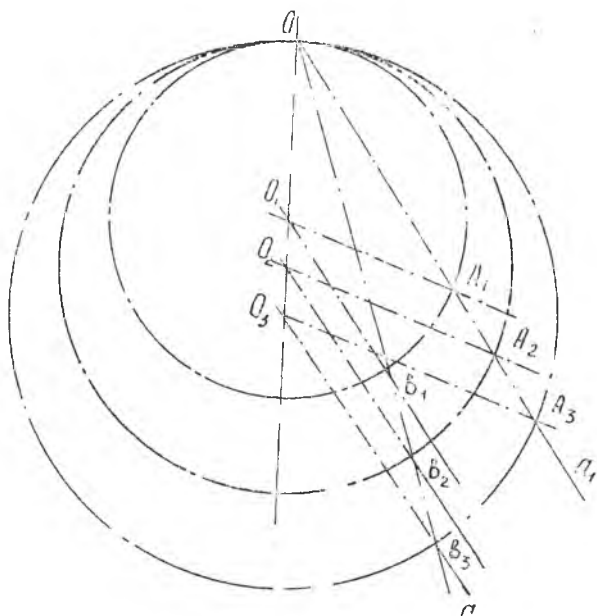


Рис. 2.9. Схема расположения осей направляющих и опорных валков

щих;  $O_1, O_2, O_3$  — центры промежуточных колец при раскатке;  $O_1A_1$  — ось опорного валика, перемещающегося по первой направляющей  $a_1$ ,  $(O_2A_2) // (O_3A_3) // (O_1A_1)$ ;  $O_1B_1$  — ось опорного валика, перемещающегося по второй направляющей  $a_2$   $(O_1B_1) // (O_2B_2) // (O_3B_3)$ .

Из схемы (рис. 2.10) видно, что при таком расположении осей направляющих и осей опорных валиков наблюдается наиболее благоприятное опирание. Вектор окружной скорости  $\vec{v}_k$  перпендикулярен оси опорного валика.

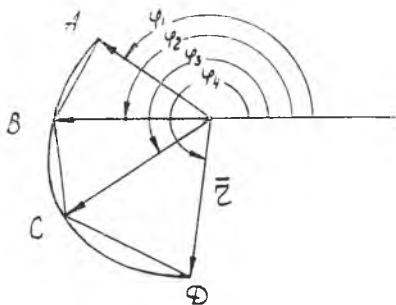


Рис. 2.10. Схема положения подвижной опоры

и т. д. будут постоянны ( $\varphi_n$  — углы осей направляющих к вектору с началом в точке  $O$  и параллельные оси, соединяющей рабочие валики). Положение подвижной опоры будет определяться только величиной вектора  $\vec{r}$ , а величина отрезка  $AB$  будет функцией двух переменных  $r_1$  и  $r_2$ ,

$$|AB| = f(r_1, r_2); |BC| = f(r_2, r_3); |CD| = f(r_3, r_4).$$

Просуммировав, получим длину ломаной линии, вписанной в заготовку. Следя за изменением длины этой ломаной линии, можно контролировать периметр нашего кольца. Причем, чем больше будет составляющих отрезков в ломаной, тем точнее можно определить размер кольца.

### 3. ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНОГО КОЛЬЦА ОБЕЧАЙКИ ИЗ СПЛАВА 1201

Конструкция закалочной печи диктуется формой и размерами обрабатываемых деталей. В рассматриваемом случае печь предназначена для нагрева кольцевых тонкостенных обечайки из сплава 1201 и должна иметь вертикальную цилиндрическую

форму. Печь состоит из рабочей камеры, центробежных вентиляторов, калориферов и выкатного пода.

Нагрев осуществляется электрическими нагревателями, воздух циркулируется с помощью центробежных вентиляторов через калориферы, направляется вдоль образующей кольцевой обечайки, причем направление циркуляции совпадает с направлением конвекции горячего воздуха, что благоприятствует работе печи.

Для нагрева кольцевой сварной обечайки с успехом можно также применить и радиационный нагрев, обеспечивающий весьма высокие удельные потоки тепла с большой скоростью нагрева.

Загружение производится с помощью выкатного пода, который приводится в движение электрическим двигателем.

### **3.1. РАСЧЕТ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ**

Размеры рабочего пространства печи в основном определяются условиями нагрева загрузки в печи в соответствии с заданным технологическим режимом с учетом обеспечения требуемой производительности.

После определения рабочего пространства обычно производят выбор материалов печной камеры, включая футеровку печи, затем рассчитывают тепловые потери, являющиеся составной частью теплового баланса электрической печи. Дальнейший тепловой расчет электрической печи включает в себя определение полезной энергии или мощности нагрева загрузки, нагрева вспомогательных устройств, потребной и установленной мощности, а также, в случае необходимости, определение времени разогрева холодной печи до рабочей температуры.

Предполагается низкотемпературная вертикально-закалочная печь (ВЗП) с температурой нагрева до  $808 \pm 5$  К.

Для интенсификации теплообмена в низкотемпературных печах принимают принудительную циркуляцию печной атмосферы со скоростью циркуляции 10—20 м/с.

Вертикально-закалочные печи широко применяются как высокопроизводительные, обеспечивающие высокую равномерность нагрева всей садки из алюминиевых сплавов.

В таких печах можно применять мощный вентилятор и, следовательно, обеспечить высокие скорости циркуляции воздуха и высокие значения коэффициентов теплопередачи как в самой печи, так и в калорифере.

Широкое распространение этих печей объясняется и их высокой надежностью, хорошими качествами металла, удобством

механизации и автоматизации процессов загрузки и выгрузки, подвергающихся нагреву материалов или изделий, высокими экономическими показателями, чистотой и удобствами обслуживания.

Объем кольца обечайки

$$v = \pi D_k \cdot h \cdot S,$$

где  $h$  — высота кольца обечайки,  $S$  — толщина стенки обечайки. Масса кольца  $G = v \rho$ ; диаметр экрана печи  $D_3 = D_k + 200$ ; внутренний диаметр печи  $D_{вн} = D_3 + 500$ ; наружный диаметр печи  $D_{н} = D_{вн} + 500$ ; высота печи  $H = h + 300$ ; площадь рабочего пространства печи  $F_{пр} = \frac{\pi D_3^2}{4}$ .

### 3.2. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА

В печах с циркулирующей атмосферы нагрев изделия обычно трудно провести при постоянной температуре, так как при загрузке изделия температура воздуха падает, поэтому процесс нагрева осуществляется в два этапа (рис. 3.1).

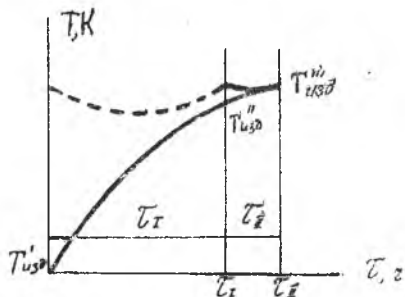


Рис. 3.1. График нагрева изделия

В первом этапе изделие нагревается постоянным тепловым потоком до некоторого промежуточного значения температуры меньше заданной, при этом система регулирования температуры не работает.

Второй этап осуществляется при постоянной температуре печи, которая поддерживается системой терморегулирования, изделие нагревается до заданной

температуры. В первом этапе можно использовать полную мощность и обеспечить быстрый нагрев, а во втором этапе осуществляется точный нагрев изделия до заданной температуры:

$$\begin{aligned} T'_{изд} &= 293 \text{ K}, \\ T''_{изд} &= 0,9 T_{нагр} \approx 755 \text{ K}, \\ T'''_{изд} &= T_{нагр} = 808 \text{ K}, \\ T_{п} &= 858 \text{ K}. \end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{общ}}$

$$\alpha_{\text{общ}} = \alpha_{\text{конв}} + \bar{\alpha}_{\text{луч}},$$

где  $\alpha_{\text{конв}}$  — конвективная и  $\alpha_{\text{луч}}$  — лучистая составляющая.  
Скорость воздушного потока  $v = 15 \text{ м/с}$ ,

$$\lambda_{\text{возд}} = 0,0491 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}.$$

Для определения конвективной составляющей коэффициента теплообмена при продольном обтекании воздухом кольцевой заготовки применим критерий Рейнольдса и Нуссельта:

$$Re_f = \frac{Vd_{\text{эkv}}}{\nu},$$

где  $d_{\text{эkv}} = 4F/n$  — эквивалентный диаметр,  
 $\nu = 80,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  — коэффициент кинематической вязкости.

$$n = \pi D_k + \pi D_{\text{эkv}},$$

$$F = \frac{\pi D_{\text{эkv}}^2}{4} = \pi D_k \cdot h,$$

$$Nu = 0,032 Re_f^{0,8},$$

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{Nu \lambda_{\text{возд}}}{d_{\text{эkv}}}.$$

$$\bar{\alpha}_{\text{луч}} = \frac{\alpha''_{\text{луч}} + \alpha'''_{\text{луч}}}{2}.$$

Приведенный коэффициент излучения

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{пл}}}{F_{\text{п}}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{п}}} - 1 \right)},$$

где  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равняется  $5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ ,  $\varepsilon_{\text{изд}}$ ,  $\varepsilon_{\text{п}}$  — соответственно степень черноты изделия и печи,  $\varepsilon_{\text{изд}} = 0,4$ ,  $\varepsilon_{\text{п}} = 0,8$ , тогда

$$\alpha''_{\text{луч}} = C_{\text{пр}} \frac{\left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4}{T_{\text{п}} - T_{\text{к}}},$$

$$\alpha'''_{\text{луч}} = C_{\text{пр}} \frac{\left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{к}}}{100} \right)^4}{T_{\text{п}} - T_{\text{к}}}.$$

Определяется степень массивности тела кольца как термически «тонкое» тело по критерию БиО:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha} h}{\lambda_{\text{к}}}.$$

Определяется поток тепла, нагревающий изделие (кольцо) в первом этапе:

$$q_1 = \alpha_{\text{общ}} (T_{\text{п}} - T_{\text{к}}'').$$

Определяется время нагрева кольца в первом этапе:

$$\tau_1 = \frac{G_{\text{к}} C_{\text{к}} (T_{\text{к}}''' - T_{\text{к}}')}{q_1 F_{\text{к}}},$$

где  $C_{\text{к}}$ —удельная теплоемкость металла изделия,  $C = 0,25$  кал/г $^{\circ}\text{C}$  в интервал температур  $T_{\text{к}}'''_{\text{изд}} - T'_{\text{изд}}$ ;  $G$ —масса металла изделия, нагреваемая за один цикл.

Определяется время нагрева во втором этапе:

$$\tau_{\text{II}} = \frac{G_{\text{к}} C_{\text{к}}}{\alpha_{\text{общ}} F_{\text{к}}} \ln \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{к}}''}{T_{\text{п}} - T_{\text{к}}'''}$$

Определяется время цикла:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{загр}} + \tau_1 + \tau_{\text{II}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{выр}}.$$

### 3.3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ

Тепловой баланс печи составляется на один цикл работы.

Выделяющееся в нагревателе тепло расходуется на нагрев металла кольца (полезное тепло), на нагрев вспомогательных устройств и деталей (вспомогательное тепло) и уходит с тепловыми потерями разного вида. Тепловые потери складываются из потерь через стены печи, излучение через открытые дверцы, люки, щели, потери при утечке нагретого воздуха:

$$Q_{\text{ц}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{стен}} + Q_{\text{изл}},$$

$$Q_{\text{пол}} = C_{\text{к}} G_{\text{к}} (T_{\text{к}}''' - T_{\text{к}}'),$$

$$Q_{\text{всп}} = C_{\text{всп}} G_{\text{всп}} (T_{\text{всп}}''' - T'_{\text{всп}}).$$

В качестве теплоизолятора целесообразно использовать минеральную вату ВМ-125:  $\rho = 150$  кг/м $^3$ ;  $\lambda = 0,0582 + 186 \cdot 10^{-3} t_{\text{ср}}$ ,

где 
$$t_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{п}} + T_{\text{к}}}{2} = \frac{858 + 808}{2} = 833 \text{ К.}$$

Определяются потери тепла через стенку печи:

$$Q_{\text{ст}} = K (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) F_{\text{расч}} \tau_{\text{ц}},$$

где  $K$ —коэффициент теплопередачи, кДж/м $^2$ ч.

$$K = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}},$$

$S_{\text{ст}} = 45$  кДж/м $^2$ /ч—сортовая сталь,

$S_1, S_2, S_3$ —толщины стенок (рис.3.2),



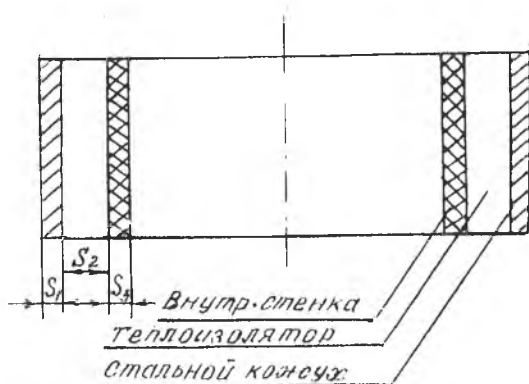


Рис. 3.2 Схема конструкции стены печи: S<sub>3</sub> — внутренняя стенка, S<sub>2</sub> — теплоизоляция; S<sub>1</sub> — металлический кожух

$T_v = 293 \text{ К}$  — температура воздуха окружающей атмосферы

$$F_{\text{расч}} = \frac{F_2 - F_1}{\ln F_2 / F_1},$$

где  $F_2$  — площадь наружной поверхности,  $F_1$  — площадь внутренней поверхности.

Тепловые потери определяются излучением:

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_v}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{отв}} \Psi_{\text{тзагр-выгр}},$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{п}} = 0,8$  — степень черноты отверстия,

$$F_{\text{отв}} = \frac{\pi D^2}{4} n,$$

$\Psi$  — коэффициент диафрагмирования,  $\Psi = 0,5$ .

Определение теплового коэффициента полезного действия печи

$$\eta_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{ц}}} 100.$$

Мощность печи должна быть такой, чтобы обеспечить работу печи в любой момент цикла, т. е. по максимальному расходу тепла. Таким периодом является первый период нагрева

$$P_{\text{п}} = K \frac{Q_1}{\tau_1},$$

где  $Q_1$  — суммарный расход энергии в первом этапе;  $K$  — коэффициент запаса, учитывающий старение теплоизоляции, падение мощности электронагревателей вследствие окисления, возможность работы на пониженном напряжении,  $K = 1,2$ .

## Электрические нагреватели

Почти все электрические печи сопротивления имеют нагревательные элементы, в которых происходит превращение электрической энергии в тепловую, передаваемую нагреваемым изделиям излучением, конвекцией или теплопроводностью. Нагревательные элементы являются одной из важнейших частей всякой электрической печи сопротивления, от их надежности в значительной степени зависит надежность работы печи.

В электрических печах с принудительной циркуляцией атмосферы используют электрические калориферы. В качестве материала нагревателей чаще всего применяется фехраль ЭИ-60, химический состав: (12...15) % Cr, (3,5...5,5) % Al, остальное Fe.

### Огнеупоры

К огнеупорным материалам для печей предъявляют следующие требования.

1. Достаточная огнеупорность, механическая прочность при высоких температурах (1883...2043) К.

2. Способность выдерживать, не растрескиваясь, резкие колебания температуры (стойкость к теплоударам).

3. Необходимо, чтобы огнеупорные материалы не вступали в химические соединения с обрабатываемыми в печи изделиями, с материалом нагревательных элементов, а также с атмосферой печи, так как это опасно не только для самих огнеупоров, но может вывести из строя нагреватели печи или привести к браку обрабатываемого изделия.

4. Сопротивляемость химическим воздействиям при нормальных и высоких температурах.

5. Достаточно малая теплопроводность.

6. Малая теплоемкость.

7. Малая электропроводность как при низких, так и при высоких температурах.

8. Дешевизна и доступность материала.

Наибольшее применение в электрических печах сопротивления нашла группа шамотных изделий с содержанием глинозема от 30 до 45%.

### 3.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧИ

От правильного выбора способа регулирования температуры печи и конкретной схемы автоматики зависят многие характеристики печи: ее коэффициент полезного действия, точность нагрева изделий, характер температурного поля в изделиях

в конце нагрева и т. п. От характера работы автоматики зависит длительность службы нагревателей и футеровки печи.

При выборе схемы автоматического регулирования необходимо учитывать, что электрическая печь сопротивления обладает большой тепловой инерцией. Это позволяет во многих случаях отказаться от непрерывного регулирования и принять двух- или трехпозиционное регулирование, которое выполняется с помощью релейно-контактных схем автоматики.

Для обеспечения равномерного поля температуры в печи необходимо регулируемую мощность разделить на отдельные «зоны» и разместить их по возможности равномерно среди нерегулируемых нагревателей. Управление такой зоной осуществляется обычно отдельной автономной схемой автоматики (рис. 3.3).

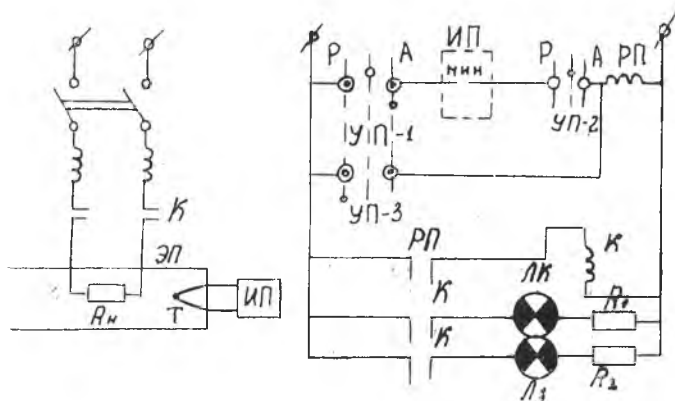


Рис. 3.3. Схема двухпозиционного регулятора электропечи сопротивления

Датчиком температуры является термопара  $T$ , установленная в рабочем пространстве печи. В качестве измерительного устройства ИП в схему может быть встроен электронный потенциометр ЭПП-09 или другого типа.

Приборы такого типа имеют контакты, которые замыкаются или размыкаются, когда температура достигает заданного значения. Эти контакты используются в схеме для включения или отключения промежуточного реле РП, управляющего работой мощного контакта К, который включает или отключает группу регулирующих нагревателей в своей «зоне».

Электронные потенциометры одновременно показывают величину температуры и регистрируют ее ход во времени на диаграмме в виде непрерывной кривой или отдельных точек. Схема двухпозиционного регулирования температуры позволяет управ-

лгать нагревом в ручном и автоматическом режиме. Универсальный переключатель УП осуществляет переход от ручного к автоматическому управлению и наоборот. В положении автоматического управления А замыкаются контакты УП-1 и УП-2.

При температуре печи меньше заданной контакт потенциометра ИП замкнут, реле РП и контактор К включены, идет нагрев печи с полной мощностью. Этот период в случае загрузки обычно достаточно растянут и образует первый этап нагрева при постоянном тепловом потоке. После достижения заданной температуры ( $+\delta T$ ) начинается собственно работа автоматики по регулированию температуры печи. Минимальный контакт ИП разомкнется, будут отключены реле РП и контактор К. Часть мощности печи отключается и начнется понижение температуры печи. При достижении температуры печи значения  $T_{\text{задан}} - \delta T$  потенциометр снова с помощью РП и контактора К включает регулирующие нагреватели и температура начнет по-

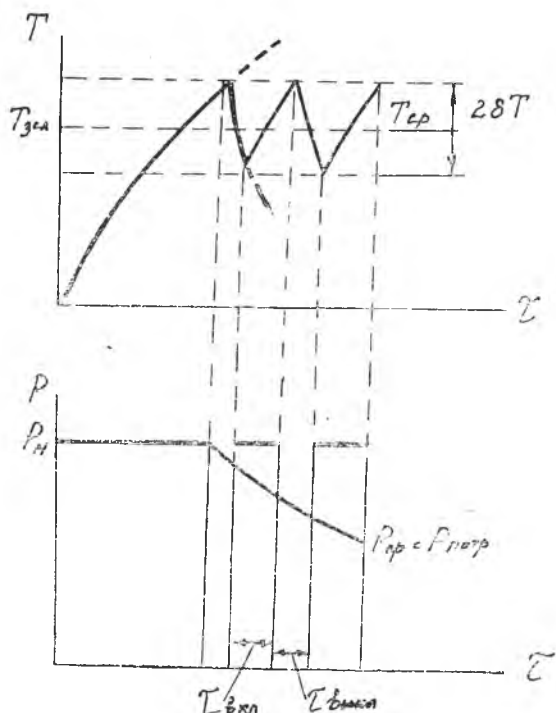


Рис. 3.4. Процесс двухпозиционного регулирования печи: а — потребляемая мощность при поэтапном включении нагревателей; б — изменение температуры во времени

вышаться. Из таких повторяющихся циклов регулирования и складывается второй этап нагрева изделия при постоянном (среднем) значении температуры печи.

Потребляемая мощность печи при поэтапном включении нагревателей и изменение температуры во времени показаны на рис. 3.4.

Средняя мощность печи во втором этапе зависит от соотношения времени включенного и отключенного состояний нагревателей регулирования печи. Полезная мощность непрерывно убывает, металл нагреваемого изделия не воспринимает колебаний температуры и нагревается при постоянной температуре печи.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ищенко А. Я., Склабинская И. Е. Особенности превращений в зоне термического влияния при сварке некоторых высокопрочных алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка, 1979, № 5. С. 26—29.
2. Ищенко А. Я., Лазовская А. В. Кинетика превращений при сварке термически упроченного сплава 1201 // Автоматическая сварка, 1980, № 1. С. 29—31, 39.
3. Рабкин Д. М., Ищенко А. Я., Саенко М. И. и др. Сварка плит из алюминиевого сплава 1201 // Автоматическая сварка, 1975, № 5. С. 58—61.
4. Зубриченко Г. Л., Тэненбаум Ф. З., Петрованов В. М. и др. Опыт сварки соединений из термоупрочняемого сплава 1201 в различных пространственных положениях // Вопросы технологии сборки конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Куйбышев: КуАИ, 1982. 138 с.
5. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Бондарев А. А. и др. Электронно-лучевая сварка и последующая термомеханическая обработка оболочек большого диаметра из сплава 1201 // Автоматическая сварка, 1983, № 9. С. 1—5.
6. Башлыков В. А., Морозов Н. П. Валки станов листовой прокатки авиационных материалов. Куйбышев: КуАИ, 1979. 55 с.
7. Куприн М. И., Куприна М. С. Основы теории прокатки. М.: Металлургия, 1978. 184 с.
8. Смирнов В. С. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1967. 400 с.
9. Отчет о работе по теме «Исследование латентной чистоты, латентности и выявление технического уровня кольцепрокатных и шаропркатных станов. ВНИИМЕТМАШ, 1967. 151 с.
10. Тодер И. А. Гидродинамические опоры прокатных валков. М.: Металлургия, 1968. 399 с.
11. Жемков П. И. Проектирование промышленных печей и нагревательных устройств. Куйбышев: КуАИ, 1973. 50 с.
12. Кацевич Л. С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей. М.: Энергия, 1977. 304 с.
13. Свечанский Р. Д., Трейзан З. П. Автоматизация электротермических установок. М.: Энергия, 1968. 264 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
1. Сварка термоупрочняемых алюминиевых сплавов . . . . .	4
1.1. Свойства термоупрочняемых алюминиевых сплавов . . . . .	4
1.2. Влияние различных способов сварки плавлением на свойства сварных соединений термоупрочняемого сплава 1201 . . . . .	7
1.3. Возможности изготовления обечаек большого диаметра из сплава 1201 с равнопрочностью сварных швов основного металла . . . . .	17
2. Деформация обечаек раскаткой . . . . .	21
2.1. Очаг деформации и его параметры . . . . .	21
2.2. Расчет размеров вала . . . . .	22
2.3. Расчет уширения прокатываемой полосы . . . . .	25
2.4. Контактные напряжения и усилие прокатки . . . . .	25
2.5. Определение затрат энергии по моменту . . . . .	28
2.6. Приближенная оценка статической и динамической прочности валков . . . . .	30
2.7. Конструктивная схема раскатной машины . . . . .	31
3. Особенности термической обработки сварного кольца обечайки из сплава 1201 . . . . .	36
3.1. Расчет габаритных размеров электрической печи . . . . .	37
3.2. Расчет времени нагрева . . . . .	38
3.3. Тепловой баланс печи . . . . .	40
3.4. Автоматизация регулирования температуры печи . . . . .	42
Библиографический список . . . . .	45

Дударь Леонид Арсеньевич

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ  
УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
ИЗ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Редактор Т. К. Кретьнина  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Куприянова

Свод. тем. пл. № 94

Сдано в набор 21.08.89 г. Подписано в печать 22.09.89 г.  
ЕО 00293. Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.  
Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. п. л. 2,9. Уч.-изд. л. 2,8. Т. 500 экз. Заказ 724.  
Цена 15 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королёва  
443086, Куйбышев, Московское шоссе, 34.

---

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института.  
443001, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.